





EL

MUNDO FISICO





ESTABLECIMIENTO TIPOGRÁFICO-EDITORIAL
BARCELONA

EL

MUNDO FISICO

POR

AMADEO GUILLEMIN

Traduccion de

D. MANUEL ARANDA Y SANJUAN

GRAVEDAD, GRAVITACION, LUZ, CALOR, ELECTRICIDAD, MAGNETISMO, ETC.

ILUSTRACION COMPUESTA DE NUMEROSAS VIÑETAS INTERCALADAS EN EL TEXTO

TOMO CUARTO



BARCELONA

MONTANER Y SIMON, EDITORES

CALLE DE ARAGON, NUMS. 309-311

1884



EL CALOR

PARTE PRIMERA

LOS FENÓMENOS Y SUS LEYES

El calor es la fuerza física cuyas leyes nos importa conocer y profundizar más que las de otra cualquiera, pues no tan sólo ejerce un influjo directo, inmediato en nuestra propia existencia, y en la de todos los séres cuya vida es indispensable para la nuestra, sino que su accion en todos los cuerpos, aunque en muy distintos grados, es tan constante, que no puede concebirse lo que serian sin ella. «Ninguno de los fenómenos actuales, dice Dumas, en su *Elogio histórico de Faraday*, puede darnos una idea de lo que seria de la materia, si dejase de estar sometida á la accion del calor, que agita hasta sus últimas partículas. Apreciamos la existencia del calor sin materia, en el vacío perfecto; pero la materia sin calor nos es desconocida.» Si este aserto del ilustre secretario perpetuo de la Academia de ciencias es cierto por lo que respecta á cualesquiera cuerpos inorgánicos, ¡cuánto más evidente no será por lo que atañe á todo sér organizado! Privacion, no ya de calor, sino tan sólo de cierto grado de calor, es sinónimo de muerte para todo cuerpo vivo, animal ó vegetal.

Reflexiónese, si no, en lo que seria de nuestras sociedades modernas, áun las ménos civilizadas, de nuestra industria, de nuestras artes, de nuestras diferentes relaciones con la poblacion entera del globo, si las mil operaciones en que se emplea el calor artificialmente fueran hoy imposibles, si llegaran á desaparecer, ya por falta de medios materiales, ó bien por la pérdida del tesoro de conocimientos acumulados relativos á su uso. Y cuenta que no hablamos aquí del fuego como elemento principal de las más sencillas operaciones domésticas, pues tendríamos que remontarnos hasta nuestros salvajes antepasados de la edad de la piedra y aún más allá para tener una idea del género de vida de los primeros hombres cuando no habian aprendido todavía á proporcionarse ó á conservar por lo ménos tan precioso elemento. Figurémonos solamente lo que sucederia si llegase á faltar el combustible en las fábricas y talleres, en las fundiciones metalúrgicas, en los altos hornos, en las fraguas, etc.; lo que ocurriria si se paralizasen de pronto las máquinas de vapor industriales, locomotoras ó marinas: ¡qué espantosa perturbacion sobrevendria en el mundo entero! Y si esta paralizacion forzada durase tan sólo por espacio de una generacion, ¡qué retroceso, qué decadencia en el mundo civilizado!

¿Cómo y hasta qué punto interviene el calor en la constitucion de la materia, ya sea en los cuerpos inertes, ó ya en los organizados? ¿A qué leyes obedecen sus variaciones y cuáles son sus consecuencias? Problema es este cuya solucion se debe buscar desde el punto de vista puramente científico.

La importancia de la ciencia del Calor no es menor desde el punto de vista práctico. La funcion del inmenso organismo del que dependen hoy en gran parte la produccion de la riqueza y el poderío de las naciones modernas, se basa principalmente en el empleo del calor y por tanto en el estudio razonado de los fenómenos por él engendrados, implicando así el conocimiento profundo de las leyes que los rigen. Sin embargo, apénas hace dos siglos que se iniciaron las primeras observaciones un poco

precisas, los primeros experimentos metódicos relativos á dichos fenómenos; y de tan reciente fecha data tambien la invencion del instrumento de medicion, del termómetro graduado, cuya falta hacia infructuoso, cuando no imposible, el estudio del calor. ¿Qué se sabia ántes acerca de él, de los efectos que produce en los cuerpos, de los cambios de volúmen y de estado que resultan de sus variaciones? Nada, ó casi nada: sobre tan importantísimos puntos sólo se tenian nociones vagas, incoherentes, algunos datos empíricos. Por fortuna, y de ello nos ofrece frecuentes ejemplos la historia de las ciencias, vino á estimular el celo de los físicos una invencion práctica ya desde su orígen, el descubrimiento del poder del vapor y de su aplicacion como fuerza motriz. Hubo que resolver muchos problemas cuya solucion era indispensable para perfeccionar la máquina de fuego, y así fué cómo la idea primordial de dos ó tres investigadores de genio sirvió de punto de partida para toda una serie de estudios puramente científicos, cuyos resultados formaron los primeros delineamientos de una teoría física del calor. A los Papin y Newcomen sucedieron los Watt, Lavoisier y Laplace, y luégo toda una pléyade de ilustres físicos, entre cuyos nombres brillan los de Gay-Lussac, Dulong, Fourier, Melloni, Prevost, Davy, Regnault, Magnus, etc. Gracias á los trabajos de tan laboriosos exploradores, á la precision creciente de sus experimentos, á sus sabios y profundos cálculos, se formularon las leyes de los fenómenos y se acumuló un crecido número de datos experimentales, con gran ventaja de las aplicaciones prácticas, y no menor provecho de la teoría. Con todo, á principios del presente siglo aún habia un gran vacío en la ciencia del Calor, lo propio que en la de la Luz.

En efecto, quedaba por resolver una cuestion fundamental: ¿cuál era la naturaleza del calor? Acerca de este punto, los físicos se dividieron en dos partidos, sosteniendo dos hipótesis igualmente admisibles al parecer, pero por una de las cuales era menester decidirse si se queria fundar una verdadera teoría. ¿Debia verse en este agente una sustancia particular, una materia sutil *sui generis*, el *calórico*, especie de flúido que penetra en los intersticios de las moléculas de los cuerpos, que se acumula en ellos, y que se difunde luégo al exterior, produciendo con su presencia, y en mayor ó menor cantidad, las elevaciones ó descensos de temperatura, los cambios de estados, etc.? ¿O bien, el calor procede, como la luz, de los movimientos que se trasmiten en forma ondulatoria por intermedio del medio que propaga igualmente las ondas luminosas? Esta segunda hipótesis es la que ha triunfado definitivamente: el calor no es ya científicamente hablando, más que una palabra á la cual no corresponde ninguna realidad material; para los físicos no es otra cosa sino un modo especial de movimiento. De esta idea de la naturaleza del calor ha nacido toda una teoría nueva, basada en el principio de que si el calor produce movimiento, recíprocamente el movimiento engendra calor; y que siempre hay equivalencia entre el trabajo mecánico y el calor en la medida exacta en que los dos modos de movimiento son susceptibles de trasformarse uno en otro. A partir de los primeros experimentos de Rumford y de los principios indicados por Sadi-Carnot, la nueva teoría ha ido surgiendo poco á poco, formulada con claridad desde luégo por Mayer, precisada y desarrollada despues por los experimentos y cálculos de los Joule, Clausius, Mackorne-Rankine, Hirn y Thomson. La teoría mecánica del calor, ó, para darle su denominacion científica, la *Termodinámica*, está hoy constituida sobre la doble base del cálculo matemático y de las comprobaciones experimentales, pudiéndose considerar esta nueva rama, ó mejor dicho, esta nueva aplicacion de la mecánica racional como la obra capital del siglo décimonono en el terreno de las ciencias físico-matemáticas.

Cualquiera que sea el interés inherente á las miras teóricas, jamás olvidaremos que su principal mérito está en servir de vínculo á los hechos prácticos. De los hechos, pues, tal como nos los presentan las prolijas observaciones y delicados y minuciosos experimentos de los sabios, nos ocuparemos ante todo, segun lo hemos hecho en los tres primeros tomos de esta obra: despues de dar en esta primera parte la descripcion de los fenómenos del calor y de exponer elementalmente las leyes á que obedecen, procuraremos presentar al lector un bosquejo de los principios en que descansa la teoría mecánica del calor y de los experimentos que la han confirmado. Pero no debe esperarse de nosotros

una demostracion rigorosa de estos principios, por cuanto requeriria operaciones y cálculos matemáticos que nos obligarian á salirnos de los límites de nuestro plan y de nuestro programa; sino que nos atendremos exclusivamente á los hechos que justifican esta concepcion grandiosa y á las importantes consecuencias que de ella se desprenden.

CAPÍTULO PRIMERO

EL CALOR EN LA NATURALEZA

I

EL CALOR Y EL MOVIMIENTO EN LA SUPERFICIE DEL GLOBO TERRÁQUEO

El movimiento parece inseparable del calor en la superficie de la Tierra, aserto que en nuestro concepto, podria hacerse extensivo fácilmente á todos los cuerpos del Universo. Pero aquí tan sólo consideramos los fenómenos de movimiento más inmediatamente observables, y haremos caso omiso de la rotacion de nuestro planeta y de su movimiento de traslacion, que, perteneciendo á los hechos cósmicos, son de incumbencia de la astronomía.

Consideremos ante todo los movimientos que se observan en el mundo inorgánico, y hagamos ver la íntima dependencia que existe entre ellos y el calor. Ocupémonos en primer lugar de los que afectan á las masas sólidas que constituyen la costra terrestre. Estas masas, colocadas generalmente, como la geología nos enseña, en capas ó estratos superficiales y concéntricos, parecen en su conjunto en equilibrio, lo cual es una apariencia, pues en realidad, léjos de ser estable este equilibrio, oscila perpetuamente á causa de los movimientos intestinos que se comunican desde las capas internas ó desde el núcleo á las superficiales: los terremotos, las erupciones volcánicas, los levantamientos ó hundimientos del terreno, bruscos y repentinos los unos, y de extraordinaria lentitud los otros, trastornan de un modo continuo por decirlo así el suelo de los continentes y de las islas, lo propio que el en que descansan las masas líquidas de los océanos y de los mares. Ocupándose el profesor Fuchs, en su reciente obra *Los volcanes y terremotos*, de la duracion y frecuencia de los segundos, demuestra que la estadística de los temblores de tierra formada por los sabios, sólo se refiere á una exigua parte de la superficie terrestre. Con todo, su número y el de sus sacudidas son bastante grandes para que dicho profesor formule una conclusion en los términos siguientes: «No pasa un dia ni siquiera una hora sin que haya alguna sacudida en la superficie del globo; y áun se puede sostener sin exageracion que la Tierra se halla en un estado perpetuo de conmocion y movimiento, ora en un punto, ora en otro de su superficie.»

Se han propuesto varias hipótesis para explicar los fenómenos volcánicos y los movimientos que afectan á la parte sólida de la corteza terrestre, hipótesis que traen aún divididos á los sabios. En concepto de unos, el núcleo de nuestro globo conserva todavía en la mayor parte de su masa su fluidez primitiva; debajo de la costra solidificada, relativamente delgada, que constituye el suelo, hay una masa cuya elevada temperatura la mantiene en estado de fusion ígnea. Las fluctuaciones accidentales ó periódicas que sufre esta masa líquida, los desprendimientos de gases ó vapores que resultan de la filtracion de las aguas del mar en esas profundidades, son las causas de las erupciones volcánicas y de los terremotos que preceden ó acompañan á dichas erupciones. Otros creen que el núcleo interior de la Tierra se ha solidificado largo tiempo hace, si no enteramente, á lo ménos en gran parte; mas para explicar las lavas arrojadas por las bocas de los cráteres suponen que todavía existen capas incandescentes y flúidas, lagos ígneos debajo de todas las regiones de naturaleza vol-

cánica. Ya se adopte una ú otra de estas hipótesis, ó se recurra simplemente á las reacciones químicas sufridas por los materiales de las capas interiores del globo, lo cierto es que, tanto para unos como para otros, el calor es la causa determinante de los continuos movimientos que ocurren en la costra sólida de nuestro planeta.

Por lo que respecta á los levantamientos y hundimientos pausados del suelo, á los movimientos que en ciertos puntos bajan el nivel de los continentes, y en otros lo hacen asomar progresivamente sobre la superficie del océano, se los atribuye á contracciones y dilataciones interiores, y por consecuencia tambien se debe atribuir su causa á variaciones de calor.

Si de la corteza sólida del globo pasamos á la parte flúida, á los océanos y mares, y luégo á la envolvente atmosférica, no vemos ya únicamente movimientos accidentales, sacudidas ó convulsiones, que se suceden con intervalos más ó ménos frecuentes aunque apreciables, sino una movilidad perpetua. Las masas profundas de las aguas, lo propio que las del aire, se hallan en un estado continuo de agitacion, dividiéndose en corrientes más ó ménos regulares ó permanentes, más ó ménos variables en su intensidad ó direccion: siendo las fluctuaciones incesantes de estas corrientes las que hacen que la ciencia de los estudios meteorológicos sea tan delicada como difícil. Por otra parte, en la superficie misma de las tierras, en los continentes é islas, los vapores suspendidos en la atmósfera en forma de nubes, derramados por las lluvias ó condensados en forma de nieve en las cumbres, son el orígen de esas innumerables corrientes, riachuelos y rios, que corren por las pendientes de los terrenos, por los declives de las vertientes, obedeciendo á la accion de la gravedad, para reunir sus aguas y llevarlas al depósito comun: el mar. Pues bien, si la gravedad es la fuerza que precipita las aguas, la que las impele en su curso, en una palabra, la que produce el movimiento en virtud del cual se acercan á la superficie del suelo, si esta misma fuerza engendra los movimientos ascendentes ó descendentes de los flúidos aéreos, hay otra fuerza, el calor, que rompe de continuo el equilibrio que propende á establecerse, siendo ella la que origina las corrientes oceánicas, la causa de la circulacion perpetua de que las profundidades del océano, lo propio que las regiones elevadas, son teatro.

La desigualdad de temperatura entre las regiones inmediatas al ecuador y las próximas á los polos, produce á causa de la radiacion solar una atraccion constante de las capas de aire frias de los polos hácia el ecuador por consecuencia del enrarecimiento y de la mayor elevacion de las masas de aire caldeadas de las zonas tropicales, dando lugar así á una corriente inversa del ecuador á los polos; estos vientos generales y predominantes sufren perturbaciones locales que tienen asimismo su orígen en las desigualdades de temperatura dimanadas de varias circunstancias. Así tambien la accion de los rayos solares sobre las aguas de los mares motiva la formacion de vapores que, mezclados con el aire, son trasportados de un punto á otro, ya en estado de vapor invisible, ó bien en el de nubes, segun el grado de saturacion de las capas aéreas. Si, á consecuencia de un enfriamiento local, ocasionado con frecuencia por la elevacion gradual de las masas de aire procedentes del océano, la condensacion de dichos vapores llega á traspasar cierto límite que á su vez depende de la temperatura, sobreviene la precipitacion en forma de lluvia ó de nieve. De este modo se renueva sin cesar el agua de los manantiales, arroyos y rios que, segun la expresion de Clausius, «forman la mitad de un curso circular cuya segunda mitad está en las nubes.»

Más adelante estudiaremos, con la extension necesaria, los movimientos de la atmósfera y de los mares, que aquí nos limitamos á mencionar, por reducirse en este momento nuestro objeto á mostrar su relacion con el calor.

Pero fácilmente se ve que esta relacion es más íntima de lo que acabamos de decir. En efecto, esa movilidad que, segun vemos, es una propiedad particular de los cuerpos cuando adquieren el estado líquido ó el gaseoso, desaparece casi enteramente cuando, por un descenso suficiente de temperatura, toman el estado sólido. Necesitan cierto grado de calor para que pueda efectuarse libremente el movimiento de las moléculas, como se observa en los líquidos; un grado mayor los trasforma en gases ó vapores, cuyas moléculas están á su vez en perpetuo

Fig. 1.—Vegetacion tropical

movimiento. Supongamos pues, que la Tierra entera, desde los polos al ecuador, está sometida á la baja temperatura que reina en las regiones polares durante sus largas noches invernales. A la agitacion actual, á las corrientes del océano y del aire que existen hoy, seguirá una inmovilidad casi absoluta. Un frio mucho más intenso, por ejemplo, el que reina más allá de los límites de la atmósfera ó en los espacios celestes (1), congelaria toda la masa de las aguas del mar, todos los vapores de la atmósfera, que formando entónces parte integrante de la corteza sólida del globo, participarian de su inmovilidad.

En el primer tomo de esta obra hemos copiado un trozo de una interesante Memoria de Lavoisier en la que se desarrolla esta hipótesis de las variaciones de la temperatura del globo terráqueo; ahora reproduciremos lo que se refiere á las consecuencias de una gran disminucion de calor. «Si la Tierra, dice, se encontrara de pronto situada en regiones muy frias, por ejemplo, las de Júpiter y de Saturno, el agua que forma hoy nuestros rios y mares, y probablemente la mayoría de los líquidos que conocemos, se trasformaria en montañas sólidas, en rocas muy duras, diáfanas al principio, homogéneas y blancas como el cristal de roca, pero que mezclándose andando el tiempo con varias sustancias, llegarian á ser piedras opacas de diferentes colores. En esta suposicion, el aire ó por lo ménos una parte de las sustancias aeriformes que lo componen, dejaria sin duda de existir en estado de flúido invisible por falta del suficiente calor; tornaria pues al estado líquido, y este cambio produciria nuevos líquidos de los que no tenemos idea alguna.»

En la época en que Lavoisier hacia estas conjeturas, aún no se habian podido licuar todos los gases. Hoy la experiencia ha justificado tan aventuradas previsiones: se han licuado y áun solidificado en parte el ácido carbónico, el oxígeno y el hidrógeno á temperaturas sumamente bajas y á grandes presiones; por consiguiente se puede hacer osadamente la suposicion de que, dado un descenso de temperatura bastante considerable, la Tierra entera quedaria convertida en una masa sólida sin atmósfera ni mares, en cuya superficie cesaria todo movimiento visible. De suerte que si el calor interno del núcleo llegara asimismo á desaparecer, de todos los movimientos que agitan sus diversas partes no conservaria más que su rotacion y su traslacion alrededor del sol (2). La inmovilidad más absoluta reinaria tanto en su interior como en su superficie. Los únicos movimientos visibles en nuestros planetas serian esos flujos periódicos ó esporádicos de los meteoros de orígen cósmico, como bólidos, estrellas fugaces, etc., debiendo añadir que estas lluvias ó caidas de meteoros no ofrecerian ya el espectáculo variado de los globos de fuego ó rastros chispeantes y luminosos que tan á menudo surcan el cielo de nuestras noches, por cuanto la luz de los meteoros emana únicamente de la trasformacion en calor de la fuerza viva de que están animados, por efecto de la resistencia que el aire opone á su movimiento.

II

EL CALOR Y LA VIDA EN LA SUPERFICIE DE LA TIERRA

Acabamos de ver cuál es el cometido del calor y de sus variaciones en los movimientos de los cuerpos inorgánicos; su influencia no es menor en el mundo de los cuerpos organizados ó vivientes. Nadie ignora que los vegetales, lo propio que los animales, necesitan cierta cantidad de calor para vivir, crecer y desarrollarse; cuando la temperatura del medio que los rodea no está comprendida entre límites determinados, variables segun las especies, las funciones vitales son imposibles y el vegetal ó el animal perecen. Además, varias de estas funciones

(1) Segun los cálculos de Pouillet, la temperatura del espacio es de unos 142 grados bajo la del hielo ó de cero.

(2) Esta hipótesis parece realizada en un cuerpo celeste íntimamente ligado á la Tierra. Todo induce á creer que la Luna carece de atmósfera y de agua. Si aún quedan dudas sobre la perfecta inmovilidad que debe de reinar en su superficie, si es posible que de vez en cuando ocurran cambios en su suelo, como varios observadores han creido notarlo de algunos años á esta parte, lo cierto es que la causa de estos cambios debe ser interna y no externa, esto es, las reacciones del núcleo sobre la corteza. Pero en este caso, la privacion de agua y de aire no puede atribuirse á la falta de calor.

No hemos dicho nada de los movimientos de las masas oceánicas que constituyen las mareas terrestres, que reconocen por causa la accion de la gravedad de la Luna y del Sol; pero claro está que con la solidificacion de las aguas, ocasionada por el frio intenso de que hemos hablado, no habria ya oscilacion semi-diurna, de suerte que este movimiento depende tambien del calor y cesaria tan luégo como el frio fuese bastante intenso para congelar las aguas del océano. Así lo reconocia Delaunay en su estudio sobre la aminoracion del movimiento de rotacion de la Tierra.

producen á su vez calor, así como otras lo consumen ó absorben. Las condiciones de esta accion recíproca del calor y de la vida son más ó ménos complejas, segun el grado de complejidad del mismo organismo. Para dar desde luégo una reseña de estas, citemos algunos párrafos de la notable obra relativa á este asunto publicada por M. Gavarret, profesor de Física en la Facultad de medicina de Paris:

«Desde el animal colocado en el punto culminante de la escala zoológica hasta el último zoófito, desde la planta más perfecta hasta el vegetal más sencillo, el sér viviente, considerado en las condiciones fisiológicas normales de su existencia y de su desarrollo, y resguardado de la accion frigorífica de la evaporacion, se presenta, siempre y donde quiera, dotado de una temperatura superior á la del aire ó del agua que lo rodea. La produccion del calor es el hecho más general y constante de la vida. Pero la vida no se conserva sino mediante una accion continua y recíproca del medio ambiente y del sér organizado. Pues bien, en el estudio de estas relaciones incesantes y necesarias del sér viviente con todo cuanto le rodea hemos debido buscar, y hemos encontrado, la causa real de esta produccion de calor tan notable y tan bien demostrada.

»El animal absorbe el oxígeno del medio ambiente y quema los materiales orgánicos que la digestion disemina por su sangre. Estas combustiones lentas, completas ó incompletas, cuyos productos son eliminados por las vías respiratorias, por la piel y por los diferentes emuntorios de la economía, le proporcionan todo el calor necesario para mantener su temperatura.

»Las simientes y las flores se agrupan junto á los animales, y así como ellos, absorben oxígeno, queman materias orgánicas y producen calor.

»Desde el momento en que comienza el movimiento de la vegetacion, y en tanto que dura, la planta saca, de la tierra por sus raíces y del aire por sus hojas, agua, sales, amoniaco y ácido carbónico. Con estos elementos *minerales*, fabrica las materias *orgánicas* necesarias para su desarrollo y destinadas á formar ulteriormente la base de la alimentacion de los animales. Este trabajo de asociacion de elementos minerales sacados del suelo y de la atmósfera, tiene por objeto y resultado la produccion de la *molécula orgánica;* las partes verdes de los vegetales no tienen otro manantial de calor.»

En lo que precede sólo se trata del calor propio de los séres vivientes, es decir, del calor desarrollado ó consumido en el seno de su organismo; pero hay una relacion no ménos íntima que enlaza su existencia con la temperatura del medio ambiente. La temperatura interna de los animales superiores ó inferiores, lo mismo que la de las plantas, es siempre mayor que la de dicho medio, y este exceso varía considerablemente de una especie á otra; pero la influencia ejercida por el calor externo en los fenómenos de la vida vegetal ó animal no es ménos importante que el calor propio del organismo, por cuanto de ella depende, en gran parte al ménos, la mayor ó menor riqueza y la mayor ó menor variedad de las floras y faunas. Verdad es que el calor no es entónces el único agente físico que interviene en esta distribucion: la luz tiene su parte de influencia, ó, lo que es lo mismo, el calor obra de distinto modo, segun que vaya ó no acompañado de luz; el agua entra tambien por mucho, y el calor húmedo produce efectos muy distintos, opuestos con frecuencia, de los del calor seco. Oigamos lo que dice acerca de todos estos puntos, y en cuanto á las plantas se refiere, un físico naturalista mencionado ya varias veces en esta obra:

«La vegetacion de cada especie, dice C. Martins, corresponde á una seccion determinada de la escala termométrica. Más abajo de cierto grado de frio, la planta perece; y muere tambien si el termómetro pasa de cierto grado de calor, prosperando únicamente entre límites de temperatura fijos é invariables. Esta escala termométrica dista mucho de ser la misma para todas las plantas; acerca de este punto, el reino vegetal presenta grandes divergencias. El alerce, el abedul enano, soportan frios de 40 grados bajo cero que congelan el mercurio, al paso que muchas palmeras, orquídeas tropicales ó helechos arbóreos sucumben áun marcando el termómetro 10 grados sobre cero. Hay plantas que viven tendidas en la arena de los desiertos de Africa, cuyo calor llega á veces de 60 á 80 grados centesimales, en tanto que las plantas alpinas ó

boreales se agostan si el termómetro se mantiene unos cuantos dias á 10 grados sobre cero. Hay sin embargo, un punto termométrico que importa considerar, y es aquel en que cada especie empieza á entrar en vegetacion. Una planta puede soportar un frio de 15 grados bajo cero y no dar señales de vida sino cuando el termómetro marca + 6º. No hay aficionado á las montañas que no haya visto con deleite las saxífragas y soldanelas en flor bañadas por el agua que gotean los campos de nieves eternas de los Alpes, agua que tiene una temperatura que pasa tan sólo algunas décimas de grado del cero, miéntras que la del aire no excede de 5 ó 6 grados. Yo mismo he visto la soldanela escondida bajo bóvedas de nieve cerradas por todas partes. En estas cavidades, la temperatura del aire y la del agua están necesariamente á cero, y sin embargo, esta baja temperatura es bastante para que germine y florezca la soldanela. Por otra parte, los cocoteros y los vegetales de la zona tórrida son insensibles á las temperaturas que no llegan á 15 ó 20 grados. Cada primavera tenemos la prueba de estas verdades largo tiempo desconocidas, viendo cómo las plantas de nuestros jardines entran sucesivamente en vegetacion á medida que el termómetro sube al grado en que el calor obra eficazmente en su vitalidad. Cada especie tiene, pues, su termómetro particular, cuyo cero corresponde á la temperatura más baja á que es todavía posible su vegetacion. Este cero es siempre superior al de todos nuestros termómetros, que corresponde á la temperatura del hielo fundente.»

El calor es un elemento tan esencial para la vida de los vegetales y para la de los animales, que no hay nada más difícil que naturalizar en una region una especie animal ó vegetal procedente de otra; entre las condiciones de éxito, la de la identidad de los extremos de la temperatura en los climas de ambas regiones es absoluta. Si no se cumple, la naturalizacion es siempre precaria y está subordinada al auxilio y á los cuidados del hombre. Por esto, como dice Martins, «no hay nada más raro que las naturalizaciones completas.» Y añade con no ménos razon: «El hombre, no contento con naturalizar las plantas y los animales útiles, ha pretendido aclimatarlos, halagándole la esperanza de que un vegetal procedente de un país cálido se acostumbraria poco á poco á un clima más riguroso; ha creido que la simiente recogida en un individuo cultivado en su nueva patria daria ejemplares más robustos. ¡Grata quimera! como ha dicho Dupetit-Thouars. El vegetal vive miéntras el termómetro y el higrómetro se mantienen en los límites que puede soportar; traspasado este límite, perece. Cada invierno es para los horticultores apasionados, manantial de amargas decepciones. El árbol que creian aclimatado, porque habia resistido muchos inviernos semejantes á los de su país, muere tan pronto como el termómetro desciende bajo el mínimum de su clima natal. Los grandes inviernos de 1709, 1789, 1820 y 1830 (y hoy podemos añadir el de 1879) han muerto árboles que estábamos acostumbrados á considerar como indígenas, verbigracia, los nogales, los morales y los castaños. Cada veinte años los olivos de Provenza y los naranjos de Liguria mueren de frio en un punto ú otro. Su muerte nos recuerda que en los países de que proceden el mercurio no desciende jamás bajo el punto de congelacion. Lo que he dicho de los vegetales es igualmente cierto respecto de los animales; su aclimatacion es una quimera. Cada especie vive y se reproduce en ciertas condiciones de temperatura y de alimentacion; fuera de estas condiciones, muere.»

Si se necesita cierto grado de calor para que la planta éntre en vegetacion, se requiere una suma determinada del mismo agente para que sus flores se abran y sus frutos maduren. Pero no hay que olvidar que la temperatura no basta; el elemento más activo es la luz, ó para hablar más exactamente, el calor luminoso.

Si se quiere comprender la influencia que las radiaciones luminosas y caloríficas ejercen en el desarrollo y en la vida de los vegetales, y en los de los animales, no hay necesidad de seguir en sus detalles los análisis de los fisiologistas que han estudiado la cuestion. Las conclusiones que de ellos resultan, ¿no están escritas en caractéres visibles, palpables, en las floras y faunas de varios climas? El viajero que recorre, tanto por el antiguo como por el nuevo mundo, las zonas sucesivas comprendidas entre el ecuador y los polos, ó solamente entre los trópicos y los círculos polares, ve desplegarse ante sus

ojos paisajes tan característicos que, por el solo aspecto de la vegetacion, puede apreciar el grado de latitud ó de altitud á que se encuentra. La naturaleza viviente, bajo su doble manifestacion de vida vegetal y de vida animal, pasa por gradaciones insensibles que afectan á la vez á las especies, y en cada una de estas á las dimensiones, al porte, etc., desde el suelo helado de las regiones árticas, cubiertas apénas de raquítico líquen, hasta las exuberantes selvas vírgenes de los trópicos.

La ciencia que, merced al detenido estudio de los terrenos de sedimento, ha reconstituido las floras y las faunas de las épocas geológicas, nos enseña que, en el pasado de la Tierra, durante esos períodos separados del nuestro por millones de años, el calor ha desempeñado un papel más importante aún que hoy dia en los productos de ambos reinos. Conviene, sin embargo, hacer observar, segun hemos dicho ya, que el calor no es el único agente físico esencial para el desarrollo normal de unos fenómenos tan complejos como los que vemos en los séres organizados; pero se puede asegurar que donde hay vida no falta á la vez produccion y consumo de calor.

La astronomía, la física del globo, la geología contribuyen de consuno á demostrar que, durante la larga historia del desarrollo de nuestro planeta, los climas han pasado en toda la superficie del globo por cambios considerables. Los vegetales que caracterizan los primeros períodos, los más cálidos, los de la hulla y de la creta, pertenecen á familias criptógamas; sus dimensiones gigantescas indican una potencia de vegetacion de la cual sólo se advierte algun vestigio en muy pocos puntos de nuestra zona tropical. Poco á poco, á medida que la temperatura terrestre se enfria, el carácter de la vegetacion cambia; árboles semejantes á los de la época actual se mezclan con las formas primitivas, y luégo van creciendo en número á medida que se van acercando los dos primeros períodos terciarios correspondientes á los terrenos de los alrededores de Paris. «En esta época la vegetacion ha cambiado completamente, dice C. Martins; los vegetales primitivos de los cuales procede la hulla han desaparecido; el paisaje tiene el aspecto del de los países cálidos y de las zonas templadas. Los árboles se parecen á sauces, á pinos, á palmeras. Por último, en el período terciario más reciente, son afines de las acacias, de los arces y de los álamos actuales, representando la aurora de la vegetacion contemporánea, de la que debe adornar la tierra á la aparicion del hombre. Los árboles del Japon, las selvas de la América septentrional son los que mejor pueden recordarnos ese período vegetal, pareciendo enlazar así la flora actual con la última flora desaparecida.»

¡Qué duracion representan todos estos cambios! ¡Cuántos millones de años han sido necesarios para la completa realizacion de esos fenómenos conexos, del lento enfriamiento de la temperatura de la Tierra y de las trasformaciones experimentadas por las especies animales y vegetales! Cuando se piensa en el número de siglos que trascurren sin producir en esas especies modificaciones sensibles, queda la imaginacion absorta ante la antigüedad de la Tierra, comparada con la cual la de la historia no es más que un punto imperceptible de la duracion!

III

EL CALOR Y SUS APLICACIONES INDUSTRIALES

Es muy probable que el hombre, lo propio que los demás animales, se concretara en un principio á aprovechar el calor que el Sol difunde sobre la Tierra y que produce los alimentos indispensables para la conservacion de la vida. Poco á poco la experiencia le enseñó á resguardarse del frio y de la intemperie cubriéndose el cuerpo con las pieles de los animales que mataba. Las cavernas le sirvieron para lo mismo, hasta que, merced á las herramientas de pedernal que labraba toscamente, pudo cortar madera y construir con las ramas y las hojas de los árboles viviendas protectoras. ¿Conoció desde el orígen el fuego y sus aplicaciones? Cuestion es esta sobrado controvertida. Darwin dice, despues de enumerar los progresos realizados por los primeros antepasados del hombre: «Ha descubierto el arte de encender fuego, merced al cual pudo hacer digeribles las raíces duras y filamentosas, é inocuas mediante la coccion, ciertas plantas venenosas cuando crudas. Este descubrimiento, el más grande sin disputa despues del del lenguaje, ha precedido á la primera aurora de la historia.» Segun sir John Lubbock, «no se puede tener por suficientemente probado

que exista en la actualidad ni haya existido en ninguna época histórica, una raza de hombres que no conociera el fuego. Lo cierto es que, remontándose á las más antiguas estaciones lacustres de Suiza y á las aglomeraciones de conchas halladas en Dinamarca, se ve que en Europa era muy conocido el uso del fuego.»

Los trogloditas del Lozère, tan bien descritos por el malogrado Broca, conocian asimismo el uso del fuego. Pero el grado de cultura de estos pueblos, unos de los cuales pertenecian á la edad de piedra, y otros á la de bronce, era ya muy avanzado relativamente, y como dice muy bien Darwin, se trata de edades que han precedido á «la primera aurora de la historia.»

Sea de ello lo que quiera, dos clases de fenómenos han podido proporcionar al hombre el fuego, ese precioso agente de toda civilizacion: el rayo, encendiendo en los bosques los montones de ramaje y de hojarasca secados por el ardor de los rayos solares; los volcanes, vomitando en sus flancos torrentes de lavas que no tan sólo ocasionaban incendios en el momento de la erupcion, sino que tambien conservaban su elevada temperatura por espacio de meses y áun de años enteros. En cuanto al modo de encender fuego artificialmente, probablemente no se descubriria hasta mucho despues. Lo que prueba cuán difícil fué en su orígen este arte, que hoy nos parece tan sencillo, es el cuidado con que lo conservaban los pueblos más antiguos. «El culto del fuego, dice sir John Lubbock, está tan generalizado, que se le puede considerar como universal. Desde la invencion de los fósforos apénas podemos formarnos una idea de la dificultad con que tropieza un salvaje para encender fuego, sobre todo cuando el tiempo está húmedo. Sin embargo, se dice que aún no hace mucho tiempo, algunas tribus australianas no sabian proporcionárselo, y que si se les llegaba á apagar, emprendian largos viajes para pedir un tizon á otra tribu. Por esto vemos establecida en el mundo entero la costumbre de delegar una ó muchas personas cuyo único cometido consiste en conservar constantemente el fuego. De aquí procede sin duda el orígen de las Vestales, y naturalmente tambien la idea de la santidad del fuego.»

Una vez el hombre en posesion del fuego, y cuando una larga experiencia y quizás tambien una casualidad propicia le enseñaron á extraer los metales del seno de la tierra, á fundirlos, á forjarlos y labrarlos, sustituyendo así el bronce y luégo el hierro á la piedra que le servia de arma y herramienta á la vez, empezó á salir lentamente de los períodos de barbarie y salvajismo de las primeras edades para entrar en el de la civilizacion. Mas para estas trasformaciones que le han conducido al umbral de los tiempos históricos han sido necesarios millares de años, de siglos tal vez. Desde entónces, ¡cuántos progresos se han realizado por el solo hecho del desarrollo de esta industria primitiva, qué camino se ha recorrido desde la antigüedad hasta nuestros dias! Y cuando se recopilan todos los servicios que presta hoy á las sociedades modernas la produccion artificial del calor, nos sentimos inducidos á comparar su importancia con los que recibimos gratuitamente del calor del Sol, calor del que sólo forman una insignificante fraccion todos nuestros focos, segun más adelante veremos. La industria emplea y utiliza directamente el calor en los altos hornos, en las fundiciones metalúrgicas, en las cristalerías, en las fábricas de productos químicos, etc., en una palabra, en todas las operaciones que requieren una temperatura elevada. En un número siempre creciente de talleres y manufacturas, el calor empleado como generador de fuerza motriz ó de trabajo mecánico tiende á reemplazar las fuerzas utilizadas hasta entónces, muy poco regulares ó demasiado costosas, aumentando así en proporcion considerable la suma de trabajo que el hombre podria sacar de sus brazos; merced al calor se ha centuplicado la actividad de la gran industria de los trasportes por tierra y por mar, que anima los innumerables hogares de las locomotoras y de los buques de vapor, y gracias á él tambien ruedan los trenes noche y dia por las barras de las vías férreas, ó los vapores surcan las aguas del océano.

Los vegetales actuales no hubieran podido bastar para alimentar todos esos focos de calor, para atender á ese asombroso consumo de combustible, y nadie ignora que, gracias á las reservas acumuladas de las vegetaciones de las edades primitivas, ha podido aumentar y aumenta de continuo semejante consumo. Quizás llegue un dia, más cercano de lo que se cree, en que, agotadas las hulleras, tenga el hombre que bus-

car un nuevo manantial de calor, so pena de ver disminuir progresivamente hasta extinguirse la produccion industrial y con ella la civilizacion en sus condiciones actuales de existencia. En todo caso, esta perspicacia basta para atestiguar la gran importancia que para nuestra especie tiene el conocimiento riguroso, profundo, de las leyes á que obedecen los fenómenos del calor, conocimiento que tal vez nos revele un dia nuevos medios de producir tan precioso agente.

IV

EL CALOR Y EL FRIO.—EL SENTIDO DE LA TEMPERATURA

La impresion que el calor causa en nuestros órganos es, como la de la luz, un fenómeno puramente subjetivo, que no nos enseña nada acerca de la naturaleza del agente físico puesto en actividad. La opinion que de un cuerpo nos formamos cuando decimos que está *caliente* ó *frio* es tambien relativa y depende, conforme lo demuestra la experiencia, así de la disposicion particular de nuestros órganos como del estado del cuerpo mismo, pudiendo suceder por otra parte que no nos produzca, bajo el punto de vista del calor, ninguna sensacion, en una palabra, que no nos parezca frio ni caliente.

Cuando tocamos este mismo cuerpo en distintos momentos, puede producirnos sensaciones diferentes y áun opuestas, ya porque en el intervalo de uno á otro se haya enfriado ó calentado en realidad, ó bien porque nuestros órganos hayan experimentado á su vez modificaciones análogas, ó ya tambien porque las dos causas de que tratamos, hayan contribuido simultáneamente á esta diferencia de impresiones. Fácil le es á cualquiera encontrar ejemplos de la influencia de ambas causas, y cualquiera comprenderá asimismo cuán difícil seria apreciar las variaciones de calor en los cuerpos, si sólo se tuviera por base de esta apreciacion las sensaciones puramente personales producidas inmediata ó mediatamente. Supongamos por ejemplo que hemos tenido algun tiempo la mano derecha metida en una vasija de agua fria, y la izquierda en otra de agua caliente, y que luégo introducimos las dos á la vez en otra vasija llena de agua tibia; experimentaremos simultáneamente dos sensaciones opuestas, una de calor y otra de frio, y sin embargo, ambas proceden del mismo cuerpo y en el mismo estado.

Otro ejemplo de la dificultad que indicamos: el aire exterior nos parece frio si salimos de una habitacion abrigada; por el contrario, el mismo aire nos parece caliente cuando salimos de una cueva fresca. ¿Quién no se habrá quejado de sentir un calor sofocante al entrar en un aposento caliente cuando fuera está helando? y, sin embargo, si en la estacion de los grandes calores llega á enfriarse el aire súbitamente, pero sin bajar del grado que nos parecia insoportable seis meses ántes, nos hace tiritar la misma temperatura que entónces nos parecia excesiva. Y es que nuestros órganos, acostumbrados progresivamente al frio ó al calor, con dificultad se habitúan á las bruscas transiciones que ocasionan en ellos sensaciones mucho más vivas.

Por último, los cuerpos de naturaleza diferente, situados en un recinto mantenido á una temperatura constante, adquieren al cabo de algun tiempo, segun veremos, la misma temperatura; físicamente hablando, son igualmente frios ó calientes, como se quiera. Sin embargo, si los unos son objetos de metal, de mármol, de vidrio, y los otros de madera, de lana ó de papel, sentiremos al tocarlos sucesivamente impresiones muy distintas: el mármol y el hierro nos parecerán frios, la lana caliente, y la madera y el papel ni lo uno ni lo otro. En una palabra, la sensacion variará con la naturaleza del cuerpo y el estado de su superficie. Por espacio de mucho tiempo se han desconocido estas nociones sobre la relatividad de las sensaciones de calor y frio, que hoy nos son familiares. Sin necesidad de referirnos á los antiguos que, oponiendo el calor al frio como elementos contrarios, consideraban el segundo como «una cualidad ó accidente que reune y junta indiferentemente las cosas homogéneas y las heterogéneas, al paso que el carácter distintivo del calor consiste en reunir aquellas y en desunir estas,» sin remontarnos á los antiguos, decimos, vemos tambien á los sabios del siglo XVII, como Gassendi, participar de las ideas de Epicuro y de Lucrecio, distinguiendo el frio del calor como propiedades de corpúsculos especiales. Para ellos los átomos frigoríficos diferian de los ígneos en naturaleza y configuracion. Hasta el siglo pasado no se llegó á formar esa idea del calor y del frio que hoy nos parece

tan sencilla, á saber, que son fenómenos de la misma naturaleza, diferentes grados de manifestacion de un mismo agente físico, y que la oposicion aparente de su modo de accion depende enteramente de la temperatura de nuestro cuerpo y de su sensibilidad.

Insistimos en estas consideraciones porque nos permitirán comprender en qué consiste que por espacio de tanto tiempo se hayan ignorado las leyes de unos fenómenos que se pueden observar continuamente. Miéntras nos hemos fiado de los sentidos para apreciar los grados de calor, sin cuidarnos de inventar instrumentos para compararlos, para medirlos, sólo se han podido tener vagas nociones sobre las leyes que los rigen. Verdad es que ha sucedido otro tanto con respecto á todos los hechos físicos ó naturales.

Casi no disponemos más que del *tacto* como sentido propio para la temperatura; pero si permite juzgar con precision de las diferencias, parece que no es así relativamente á los grados absolutos de aquella. Además, esta especie de sensibilidad debe de ser sumamente variable de una persona á otra, conforme podemos advertirlo observando en torno nuestro. La facultad que tiene la piel de apreciar las diferencias de temperatura ha sido objeto de experimentos interesantes por parte de Weber, el cual ha visto que con el dedo se pueden distinguir diferencias de $^1/_4$ de grado centígrado, miéntras que la apreciacion de la temperatura absoluta, que exige indudablemente un estudio prévio, no es exacta sino con 2 ó 3 grados de diferencia. Esta sensibilidad es casi la misma para todas las temperaturas inferiores á 37°, es decir, á la de nuestra sangre, pero dista mucho de ser tan grande para todas las regiones de la piel. Así es que el dorso de la mano es más sensible al calor que la palma, y lo son mucho más los párpados, los labios y la lengua. Tambien se dice que el codo posee una sensibilidad especial por este concepto, debida sin duda más bien á la delgadez de la piel que á la falta de grasa en dicha region. Las madres conocen esta particularidad, la cual aprovechan cuando quieren bañar á sus hijos, pues entónces meten el codo en el agua del baño como pudieran hacerlo con un termómetro. Refiriéndose Berstein al caso que acabamos de mencionar, añade:

«Debemos admitir tambien que hay en la piel órganos particulares de temperatura, órganos que tienen sus nervios propios y que en unas regiones están más desarrollados que en otras. Y en efecto, se ha probado que los troncos nerviosos no poseen la facultad de producir la sensacion de calor cuando se los calienta directamente. Por ejemplo, en la region del codo, inmediatamente debajo de la piel y sobre el hueso hay un nervio que ocasiona vivos dolores cuando recibe un golpe. Cuando se introduce el codo en agua caliente, sólo se siente el calor en la parte sumergida y no en todo el brazo, áun cuando dicho nervio corre por el antebrazo hasta la mano. Pero si el agua está demasiado caliente se experimenta un dolor vago en toda la region del antebrazo. Así pues, el calor del agua excita el tronco nervioso, siquiera esta excitacion no se da á conocer por una sensacion de calor, sino por el dolor. Cuando se mete el codo en agua helada, el dolor es absolutamente el mismo, de donde resulta que los troncos nerviosos son incapaces de sentir calor ó frio. La sensacion de dolor que resulta en este caso es probablemente la causa de la sensibilidad extraordinaria que produce en el codo un calor demasiado fuerte, y por tanto nocivo.

»Puede pues presumirse que los nervios tienen en la piel órganos especiales de temperatura capaces de producir una excitacion nerviosa por la influencia del calor. Pero hasta ahora no se han descubierto órganos de esta clase, ó mejor dicho, no se ha podido atribuir esta funcion á órganos conocidos. Los corpúsculos táctiles quizás sirven al propio tiempo para la funcion del tacto y para la sensacion del calor, mas no se puede asegurar nada con respecto á este punto. Weber ha descubierto un hecho muy interesante y es que los cuerpos calientes parecen más ligeros que los frios. Cuando se pone sobre la frente de una persona que tenga los ojos cerrados una moneda de 5 pesetas fria y luégo otras dos calientes, estas parecerán tener el mismo peso que aquella sola, y sin embargo la persona en cuestion podrá distinguir muy bien la diferencia entre el peso de los cuerpos frios. Parece pues que existe una relacion entre el sentido de la temperatura y el del tacto, pero hasta ahora no se ha estudiado científicamente esta relacion.»

V

PRINCIPALES EFECTOS DEL CALOR.—DIVISIONES DE LA CIENCIA

Por fortuna se han podido completar las indicaciones tan poco exactas que nuestros sentidos pueden proporcionarnos sobre el grado de calor de los cuerpos, con instrumentos cuya construccion y graduacion están basadas en los efectos producidos en aquellos por las variaciones mismas del calor. Estos efectos, estudiados de un modo puramente objetivo, independiente de toda apreciacion personal, son por una parte los *cambios de volúmen*, y por otra los *cambios de estado.*

La *dilatacion* de los sólidos, de los líquidos y de los gases por la influencia de un aumento de calor, el fenómeno inverso de la *contraccion* que caracteriza una disminucion de calor y devuelve al cuerpo el volúmen que tenia en las condiciones idénticas, son un fenómeno general y constante que servirá de asunto para los primeros capítulos consagrados á los fenómenos caloríficos. Hemos dicho ya en el primer tomo, al resumir las propiedades generales de los cuerpos, que la ley de continuidad que enlaza el aumento de volúmen con el de la temperatura, está sujeta á dos interrupciones bruscas que corresponden á los dos pasos del estado sólido al líquido y de este al de vapor ó de gas. Los puntos críticos de que hablamos sufren, además de la influencia del calor, la de la presion; pero, á igualdad de condiciones de presion y de temperatura, los *cambios de estado,* en un sentido ó en otro inverso, ofrecen asimismo al físico un término fijo de comparacion, un punto de referencia precioso, que utiliza especialmente para la graduacion de sus aparatos de medicion.

A continuacion de los cambios de volúmen, describiremos en esta primera parte los de estado.

Los cuerpos no se calientan ni enfrian sino comunicándose mutuamente el calor de que están dotados, ora mediante el contacto de sus moléculas, ora á mayor ó menor distancia, es decir, emitiendo hácia fuera su calor, del propio modo que los focos luminosos radian su luz en todas direcciones. Este doble modo de propagacion del calor da lugar á dos series de fenómenos cuyas leyes estudiaremos separadamente en los capítulos consagrados al calor *radiante* y á la *conductibilidad.*

Seguirá despues la parte de la ciencia del Calor que puede considerarse como la más importante, si fuese permitido establecer grados por este concepto, y si todas las leyes físicas relativas á una misma clase de fenómenos no concurriesen por igual al último resultado, ó sea al establecimiento de una teoría general. Nos referimos á los medios merced á los cuales se mide, no tan sólo el grado, sino tambien la cantidad de calor necesaria para obtener un efecto determinado en un cuerpo de peso y temperatura dadas. Esta parte es la *calorimetría.*

Despues de haber perfeccionado los métodos calorimétricos y acumulado los datos exactos que se han podido calcular gracias á estos métodos, se ha abordado por fin de un modo provechoso el gran problema del calor, y demostrado que no es una sustancia propia, sino un modo de movimiento, una vibracion de las moléculas de los cuerpos, que se comunica al éter y se propaga con la misma velocidad que la luz. Los rayos de calor ó los rayos de luz, ó más rigurosamente hablando, las ondulaciones luminosas y las caloríficas son movimientos idénticos, que sólo difieren por su modo de obrar en nuestros órganos, produciendo aquí una sensacion de luz y allí otra de calor. Con la exposicion de esta teoría del calor, con las nociones más elementales de la *termodinámica*, terminaremos esta primera parte, dejando para la segunda todo cuanto se refiere á la aplicacion de los fenómenos y de las leyes á las ciencias ó á las artes industriales.

En resúmen, nuestro estudio de los fenómenos y de las leyes del Calor comprenderá cinco divisiones principales: los *cambios de volúmen*, los *cambios de estado*, la *propagacion del calor* por radiacion ó por conductibilidad, la *calorimetría* y la *termodinámica.* Estas son tambien las grandes divisiones de la ciencia, estando comprendidos en alguna de dichas categorías todos los hechos que la observacion y la práctica han permitido comprobar hasta ahora.

Esto sentado, entremos en materia.

CAPÍTULO II

DILATACION Y TERMOMETRIA

I

FENÓMENOS GENERALES DE DILATACION

Todos los cuerpos aumentan de volúmen ó *se dilatan* cuando se calientan, cualquiera que sea su estado físico, exceptuándose unos pocos de los que nos ocuparemos más adelante. Por el contrario, cuando se enfrian, *se contraen.* Describamos algunos experimentos con los cuales se demuestra fácilmente esta propiedad, que lo mismo poseen los sólidos, que los líquidos ó los gases.

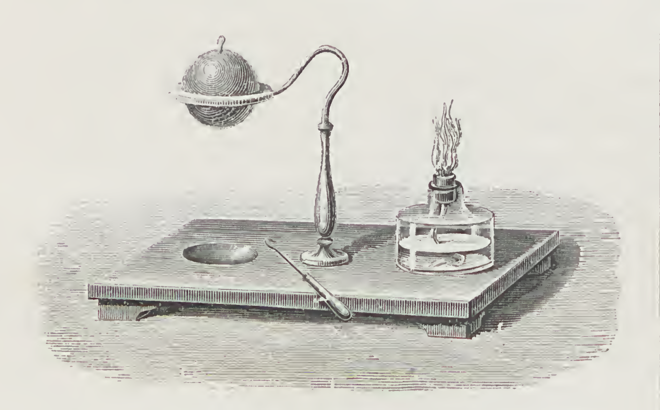


Fig. 2.—Anillo de 'S Gravesande. Dilatacion de los sólidos por el calor

Supongamos una esfera metálica y una anilla de la misma materia y de dimensiones tales que, en condiciones térmicas semejantes, la esfera puede pasar á frotamiento suave por la abertura de la anilla. Si se calienta la bola aisladamente y se la pone sobre la anilla, no puede ya pasar por ella, lo que prueba que se ha dilatado de resultas del calor; pero si se la deja enfriar y volver á su estado primitivo, pasará de nuevo. Si, por el contrario, se calienta la anilla, la esfera metálica pasa con facilidad al través de la abertura, de lo cual se deduce que esta abertura se ha agrandado ó que la anilla se ha dilatado. Por último, si se calientan la anilla y la esfera al mismo tiempo, ambas aumentan de volúmen á la vez y conservan las mismas relaciones de posicion que en un principio. Conócese este pequeño aparato con el nombre de *anillo de 'S Gravesande,* del nombre del físico holandés que lo ideó.

Los académicos de Florencia habian demostrado, con un experimento análogo, la dilatacion que los sólidos experimentan á causa de un aumento de calor. En vez de una esfera, empleaban al efecto un cono metálico que el anillo abarcaba á diferentes alturas, segun que se los calentaba á uno ó á otro separadamente. Si el aumento de calor era el mismo para el anillo y para el cono, es decir, si á ambos se les calentaba á la vez y del mismo modo, aunque aisladamente, el anillo bajaba por el cono hasta una altura invariable. Este último hecho nos proporciona una primera indicacion importante acerca del modo cómo se dilatan las vasijas de cualquier forma, cilíndrica, cónica, etc. Su cambio de volúmen se efectúa como si la vasija estuviese llena de la misma sustancia que la forma; su capacidad interior varía como variaria el volúmen del núcleo sólido de que hablamos, estando en las mismas condiciones térmicas. Ya volveremos á ocuparnos de este asunto.

La dilatacion de los cuerpos sólidos por el calor se efectúa en todos sentidos, de suerte que una barra de hierro que tenga la forma de un paralelepípedo aumenta en sus tres dimensiones, anchura, longitud y grueso. De aquí resultan tres clases de dilataciones: la cúbica, la superficial y la lineal, la última de las cuales se hace patente con el aparato representado en la figura 3, y el cual consiste en una barra metálica sujeta invariablemente por uno de sus extremos: calentada en toda su longitud, se dilata libremente por el extremo que se apoya en el brazo menor de una palanca acodada, de suerte que la aguja que forma el brazo mayor de la misma palanca describe en un cuadrante

graduado un arco tanto mayor cuanto más considerable sea á su vez la relacion entre las longitudes de ambos brazos. De este modo se hacen perceptibles hasta las menores prolongaciones de la barra, que con dificultad se podrian medir directamente. Por ejemplo, bastará trasladar semejante aparato de una habitacion fria á otra caliente para que la aguja se ponga en marcha.

La variacion del calor produce en los líquidos variaciones de volúmen mucho más marcadas que en la mayoría de los cuerpos sólidos.

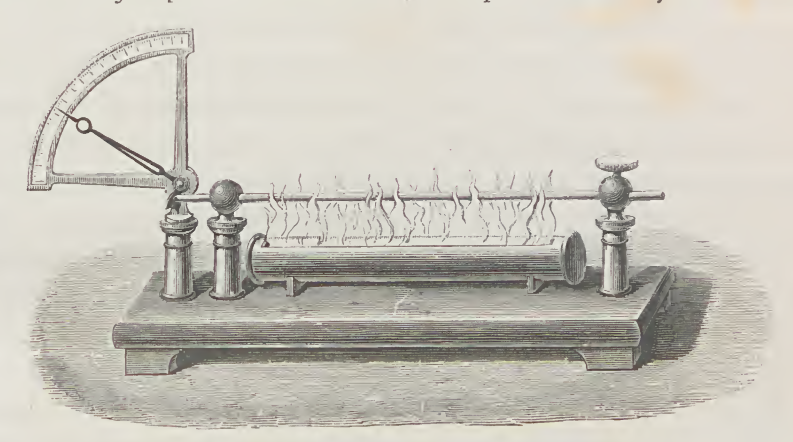


Fig. 3.—Dilatacion lineal de una barra sólida

Hé aquí uno de los medios de que se hace uso para poner en evidencia la dilatacion de los líquidos.

Tómase un globo de vidrio al cual está soldado un tubo abierto de reducido diámetro; se le llena del líquido que se quiere someter á prueba, y se marca con una raya *a* el punto hasta donde sube en el tubo (fig. 4). Metiendo entónces el globo en agua más caliente que el líquido, se puede observar fácilmente el movimiento de este en el tubo. Al principio se ve bajar el nivel de *a* á *b*, lo cual consiste en que la envolvente de vidrio es la primera que recibe la accion del calor. Su capacidad crece ántes que el volúmen del líquido interior haya podido compensar este aumento con su dilatacion propia. Pero al poco tiempo la contraccion aparente cesa, y el líquido sube poco á poco hasta un punto *a'* en el que se fija cuando se ha restablecido el equilibrio. Si el aparato se enfria, el nivel bajará poco á poco hasta recobrar por último su altura primitiva.

Los líquidos de diferente naturaleza no se dilatan con igualdad en las mismas circunstancias, es decir, siendo el mismo el aumento de calor. Pero todos, casi con una sola excepcion de la que en breve nos ocuparemos (la del agua), aumentan ó disminuyen de volúmen, segun que se calienten ó se enfrien.

Por último, los gases son tambien más dilatables que los líquidos; así es que basta acercar al fuego una vejiga herméticamente cerrada y llena á medias de aire para ver cómo se infla poco á poco, y por consiguiente el aire que contiene aumenta de volúmen con el calor. Demuéstrase tam-

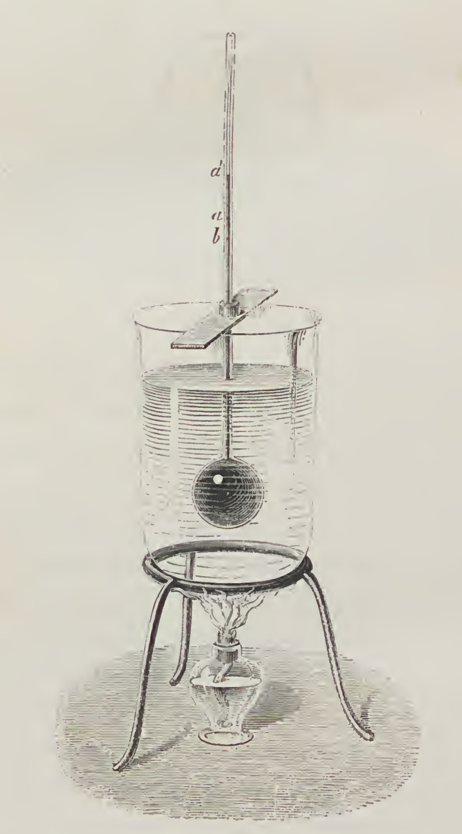


Fig. 4.—Dilatacion de los líquidos por el calor

bien de otro modo la dilatabilidad del aire ó de cualquier otro gas por efecto de un aumento de calor, para lo cual se toma un globo de vidrio terminado en un largo tubo capilar abierto en

su extremo. El globo está lleno del gas cuya dilatacion se desea comprobar y que está separado del aire exterior por un índice de mercurio. Tan luégo como se calienta el globo, aunque sea ligeramente, por ejemplo, aplicando á él las manos, el gas interior se calienta tambien, se dilata y expulsa el índice fuera del recipiente. Al enfriarse el gas, su volúmen disminuye y el índice recobra su posicion primitiva.

Valiéndose de un tubo doblemente encorvado (fig. 5), que contenga líquido en el codo

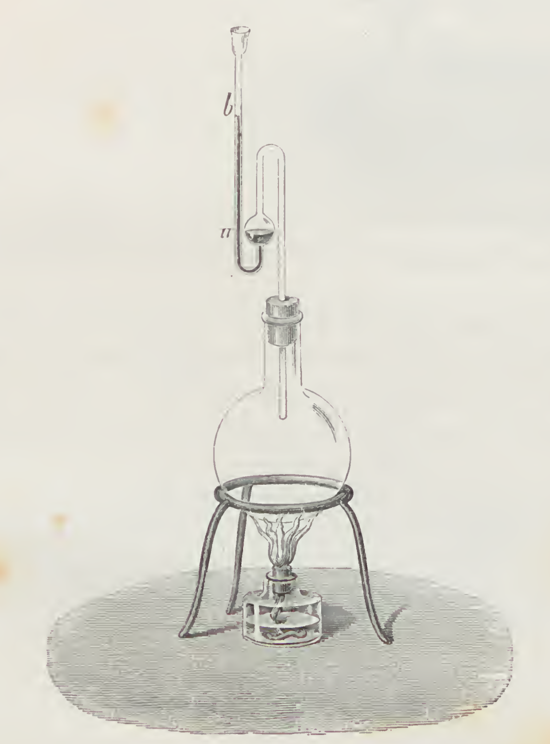


Fig. 5.—Dilatacion de los gases

inferior, la dilatacion se manifiesta por la ascencion, de *a* á *b*, del líquido en uno de los brazos, que es el más separado del globo, al paso que el nivel baja en el otro.

Al consignar Desains en sus *Lecciones de Física* que el holandés Drebbel fué quien hizo á principios del siglo XVII los primeros experimentos sobre la dilatacion del aire por el calor, cita un curioso párrafo de Heron de Alejandría, que prueba que los antiguos conocian ya el fenómeno y áun que lo habian aprovechado para producir efectos bastante curiosos. Hé aquí dicho párrafo:

«Tratábase de hacer de modo que «las puer»tas de un templo se abriesen por sí mismas »en el momento en que se encendiera el fuego »sagrado en un ara situada en el vestíbulo.» El ara era de bronce, hueca interiormente, y comunicaba por un conducto con un odre colocado en un sótano debajo de las puertas. El odre estaba distendido y estirado por un peso. Cuando se encendia el fuego sagrado, el aire del ara, dilatado por el calor, pasaba al odre que se hinchaba encogiéndose y levantando de este modo el peso, y este movimiento se trasmitia por medio de cuerdas á un eje vertical á cuyo extremo estaba unida la puerta; y la rotacion del eje la obligaba á abrirse. Cuando se apagaba el fuego, el enfriamiento del aire hacia que el peso motor bajase hasta volver á su primera posicion, y la puerta se cerraba.»

Las variaciones de volúmen por efecto de las de calor constituyen un fenómeno general que lo mismo se observa en los líquidos y en los gases que en los sólidos. Las excepciones de esta ley sólo son aparentes, ó se limitan á casos particulares, y más adelante veremos qué interpretacion puede darse á estos. La madera y la mayoría de los vegetales se contraen cuando se los calienta, lo cual proviene del agua que pierden por evaporacion; pero cuando están enteramente secos, se dilatan como los demás sólidos. La arcilla, bien seca, se contrae tanto más cuanto más intenso es el calor á que se la somete; pero resultando un estado químico en la sustancia, un principio de vitrificacion, pues cuando el pedazo de arcilla se enfria no recobra ya su volúmen primitivo. Por último, cuando el agua está á punto de congelarse, se dilata al enfriarse, anomalía que dimana sin duda de una modificacion en la forma y disposicion de las moléculas (1).

Puesto que el volúmen de cualquier cuerpo varía con su temperatura, sin que haya alteracion en su peso, es evidente que su peso específico varía tambien; disminuye cuando el cuerpo se calienta, aumenta cuando se enfria, de suerte que este elemento exige, como lo hemos visto en nuestro primer volúmen, ó que se opere á la temperatura fija de cero, ó que, si esto no es posible, se conozca la cantidad en que aumenta el volúmen por cada aumento de su grado de calor. En semejante caso, tambien es necesaria

(1) Sin embargo, más adelante veremos que M. Fizeau ha echado de ver una excepcion en la ley general de la dilatacion de los sólidos por el calor: el ioduro de plata se contrae y recobra su volúmen cuando se le vuelve á su primera temperatura. Esta excepcion singular no parece susceptible de las explicaciones que acabamos de dar relativamente á la madera, á la arcilla y al agua.

la medida de la temperatura. Merced á estos datos y á una correccion conveniente, se obtiene el peso específico ó la densidad del cuerpo á cero.

En todo cuanto precede, lo propio que en todas nuestras descripciones anteriores de los fenómenos físicos, luminosos, eléctricos ó sonoros, hemos supuesto que se conocia el uso del termómetro y la definicion de su graduacion. De este modo nos hemos encerrado, por decirlo así, en un círculo vicioso; pero esto es inevitable en las ciencias físicas, en que los fenómenos de distinta naturaleza dependen con frecuencia unos de otros. Ha llegado, sin embargo, el momento de detenernos en tan importante punto y de describir con algunos detalles el precioso instrumento que acabamos de nombrar: pues en efecto, su construccion está basada precisamente en los fenómenos de dilatacion. Cuando hayamos terminado esta descripcion, completaremos lo que nos queda por decir acerca de estos últimos.

II

DEFINICION DE LA TEMPERATURA.—SU MEDICION CON EL TERMÓMETRO

Las palabras *termometría* y *termómetro* significan, refiriéndonos á su etimología literal, *medida del calor*, instrumento que tiene por objeto la *medida del calor*. Pero este no es el sentido exacto de dichas expresiones, é importa desde luégo disipar toda idea errónea acerca de este punto.

El termómetro no mide ó marca las cantidades de calor, sino solamente las variaciones de la *temperatura*, del estado térmico de los cuerpos. Ahora bien, ¿qué es la temperatura, qué idea precisa debemos formarnos de esta expresion, que tan á menudo se encuentra en el lenguaje científico?

Cuando dos ó más cuerpos se hallan en presencia uno de otro en un espacio limitado, sucede por lo comun que unos pierden calor ó se enfrian, al paso que otros se calientan ó lo adquieren. A estos aumentos y disminuciones de calor corresponden, segun acabamos de ver, dilataciones y contracciones, cambios de volúmen de los cuerpos que están contiguos. Luégo veremos por qué manera se produce este cambio que, al cabo de algun tiempo y si no interviene ningun manantial de calor, viene á parar á un estado estacionario, de equilibrio entre todos los cuerpos en cuestion. Este estado de equilibrio térmico es lo que se llama temperatura, diciéndose que tienen *la misma temperatura* todos los cuerpos entre los cuales existe, en cierto momento, dicho estado al cual corresponde un volúmen determinado para cada uno de ellos. Si uno se calienta por cualquier motivo, aumentando por consiguiente de volúmen, dícese que su temperatura *sube*; y que *baja* si el cuerpo se enfria y disminuye de volúmen. Pero siempre que, tras algunas variaciones de temperatura, de calentamientos ó enfriamientos, el cuerpo recobra su volúmen primitivo, su temperatura vuelve tambien á ser la misma, y puesto en presencia de los sistemas con los cuales estaba anteriormente en equilibrio y que, por hipótesis, no han cambiado, resultará otra vez equilibrado con ellos. La experiencia demuestra en definitiva que á una cantidad de materia dada é invariable de cierta sustancia corresponde, respecto á un estado térmico particular, un volúmen determinado del cuerpo; de lo cual se desprende que las variaciones de la temperatura se pueden medir por las variaciones de volúmen ó las dilataciones. Y en efecto, supongamos que se toma un cuerpo sólido, líquido ó gaseoso y que se haga de modo que la cantidad de materia de que se compone subsista invariable, ó, si se quiere, que su peso sea siempre el mismo. Concíbese la posibilidad de medir, cuando se calienta ó se enfria, ya su volúmen mismo ó bien las variaciones de este volúmen. Pues estas variaciones ó grados son precisamente los que servirán de medida del calentamiento ó enfriamiento del cuerpo, de suerte que siempre que tenga el mismo volúmen determinado, será fácil cerciorarse de que se halla en el mismo estado térmico, que está á la misma temperatura.

Pero si estas variaciones de volúmen pueden servir para indicar los cambios que sobrevienen en la temperatura de los cuerpos, hay que guardarse de creer que medirian tambien las cantidades de calor que han servido para producirlas. Despues veremos que, en efecto, para hacer subir un mismo número de grados la temperatura de cuerpos diferentes, por ejemplo un kilógramo de agua y otro de hierro, oro ó

mercurio, no puede ser, ni con mucho, la misma la cantidad de calor que para ello se emplee.

Vese pues, segun las precedentes consideraciones, que un termómetro no es otra cosa sino un cuerpo, cuyas variaciones de volúmen, determinadas por las de su propia temperatura, se saben medir. Acercándolo ó mejor aún poniéndolo en contacto con cualquier otro cuerpo, se pondrá en equilibrio térmico con él, y por esto mismo indicará la temperatura de este cuerpo; pero no la anterior al contacto, sino la de equilibrio. Convendrá pues hacer que la diferencia entre estas dos temperaturas sea la menor posible, para lo cual será preciso que la masa y la naturaleza de la sustancia que forman el instrumento sean tales que el contacto no modifique sensiblemente la temperatura del cuerpo puesto á prueba. Por esto se han de tener en cuenta ciertas condiciones particulares en cuanto se refiere á la eleccion de la sustancia que se ha de emplear para la construccion del termómetro.

Como todos los cuerpos sólidos, líquidos y gaseosos se dilatan, se podrian tomar unos ú otros indiferentemente por cuerpos termométricos, y en realidad se los emplea igualmente para este uso. Mas para las temperaturas usuales y las observaciones corrientes se prescinde de los sólidos y de los gases. Los primeros son poco dilatables, cuando no son muy grandes las variaciones de temperatura; además, la accion del calor modifica su estructura molecular, de suerte que al enfriarse no recobran rigurosamente su volúmen primitivo. Así es que sólo se les usa para medir temperaturas muy altas, y para distinguir á estos aparatos de los termómetros comunes se les da el nombre de *pirómetros.* Con todo, describiremos algunos aparatos muy sensibles, cuyas indicaciones están basadas en las desigualdades de dilatacion de los metales, y que son muy á propósito para marcar tenues y rápidas variaciones de temperatura.

Si los sólidos se dilatan demasiado poco, no sucede lo mismo con los gases, cuyas notables variaciones de volúmen los hacen eminentemente propios para indicar diferencias de temperatura apénas perceptibles. Por desgracia, junto á esta ventaja adolecen de un grave inconveniente: sus cambios de volúmen no dependen de su sola temperatura; sino que sufren la accion de las variaciones de presion, de suerte que el uso del termómetro de gas, que por otra parte es un aparato molesto, y no portátil, se complica con la observacion del barómetro y con los cálculos necesarios para las reducciones á una presion constante.

Por consiguiente, se ha dado á los líquidos la preferencia, y entre estos al mercurio y al alcohol, que son los más comunmente usados. Al primero se le obtiene puro fácilmente; subsiste líquido á una temperatura muy elevada y no se solidifica sino á temperaturas muy bajas; su dilatacion es regular, y su conductibilidad, es decir, la rapidez con que se calienta ó enfria, es mayor que la de todos los demás líquidos. En cuanto al alcohol, si se reduce á vapor á una temperatura poco elevada, en cambio no se le ha podido congelar, sea cualquiera el grado de frio á que se le haya expuesto, lo que le hace sumamente á propósito para medir temperaturas bajas. Así pues, en un termómetro de mercurio y otro de alcohol se pueden medir todas las temperaturas comprendidas entre las más bajas que se conocen y la de la ebullicion del mercurio. Pero como el primero de estos aparatos es el que sirve para graduar el segundo, su descripcion habrá de preceder naturalmente á la del otro. Digamos pues qué operaciones requiere la construccion de un termómetro de mercurio.

III

TERMÓMETRO DE MERCURIO.—CONSTRUCCION Y GRADUACION

El termómetro de mercurio se compone de un tubo de vidrio de diámetro interior muy reducido ó capilar, cerrado por un extremo, y terminado por el otro en un recipiente esférico ó cilíndrico (fig. 6). El recipiente y una parte del tubo contienen mercurio perfectamente puro, y el resto de este último está enteramente purgado de aire y de cualquier otro gas. Como la capacidad interior del tubo no es más que una pequeñísima fraccion de la capacidad del recipiente, la menor variacion de volúmen de este se conocerá por un cambio notable del nivel del mercurio en el tubo. Para medir estas variaciones, se ha convenido en marcar en el tubo del termómetro dos puntos que corresponden á dos temperaturas desiguales, pero una y otra fijas é invariables, y en dividir en cierto número

de capacidades iguales el aumento total de volúmen que experimenta el instrumento al pasar de la temperatura más baja á la más alta. Habiendo demostrado la experiencia que el hielo se funde siempre á la misma temperatura, y que la del agua hirviendo es tambien constante cuando la presion barométrica es de 760 milímetros, se ha convenido en adoptar estas dos temperaturas fijas como puntos de partida para la graduacion del termómetro de mercurio. Antes de decir cómo se procede para esta graduacion, ocupémonos de algunos puntos importantes de la manipulacion que tiene por objeto la eleccion del tubo, y el modo de llenarlo de mercurio bien purificado y purgado de aire.

Fig. 6.—Depósito y tubo del termómetro de mercurio

La pureza del mercurio es una de las principales condiciones que se deben llenar para tener un buen termómetro. Hé aquí cómo se expresa Buignet acerca de este punto en sus excelentes *Manipulaciones de física.*

«El mercurio que se encuentra en el comercio y que ha permanecido algun tiempo en las cubetas de nuestros laboratorios contiene siempre óxido de mercurio, y áun con frecuencia metales extraños, como zinc, cobre y plomo. La presencia de estos metales modifica profundamente sus propiedades físicas, y entre otros caractéres le da el de adherirse al vidrio, dejando en él una huella de su paso y siendo por tanto impropio para los usos termométricos.

»La destilacion es un medio de purificacion muy incompleto. En el momento en que el mercurio entra en ebullicion, los metales que le acompañan emiten vapores cuya tension es muy sensible, y que el vapor mercurial arrastra consigo fácilmente. Hay pues que recurrir á otro procedimiento; el que, segun se considera hoy, da mejores resultados es el tratamiento por el ácido nítrico.

»Este procedimiento consiste en introducir en un gasto de vidrio el mercurio que se quiere purificar, y en añadir 0,01 en peso de ácido nítrico á 1,42 préviamente diluido en dos veces su volúmen de agua. Pónese la vasija en un baño de María á 50° ó 60°, y se la tiene en él veinticuatro horas, agitando con frecuencia la mezcla. Al cabo de este tiempo, se quita por decantacion la solucion que sobrenada, la cual se lleva los metales extraños, y en seguida se lava el mercurio así purificado y se le seca cuidadosamente.

»El mercurio, expuesto al aire, absorbe el oxígeno de este, sobre todo durante los calores del verano, y forma óxido de mercurio, que, desde el punto de vista que nos ocupa, adolece de los mismos inconvenientes que los metales extraños de que acabamos de ocuparnos. Cuando se agita el mercurio así alterado, el óxido que contiene se disemina en la masa; pero dejándolo reposar, sube á la superficie y forma en ella una película gris. En los laboratorios de física se acostumbra introducir en un embudo de vidrio provisto de una llave el mercurio ya purificado y seco como acabamos de decir. En el momento de hacer uso de él, se abre poco á poco dicha llave, y se pasa el líquido á una vasija muy limpia y bien seca. De este modo se obtiene mercurio exento de óxido, perfectamente tornasolado, que no se adhiere al vidrio ni á la porcelana, y que rueda sobre cualquiera de ambas sustancias sin dejar la menor huella.»

Cuando se han observado las minuciosas precauciones necesarias para obtener mercurio de perfecta pureza, se comprende que no sea ménos importante introducirlo en un tubo que á su vez esté perfectamente seco y sin polvo alguno. Este es asunto del constructor que proporciona el tubo provisto de su recipiente y de la ampolla terminada en delgada punta por la cual se ha de introducir el mercurio. Hé aquí cómo se efectúa esta operacion.

Se rompe la punta de la ampolla y se calienta ésta ligeramente sobre una lámpara de alcohol; el aire interior se dilata, y en seguida se mete la punta abierta en el mercurio como se ve en la fig. 7. El enfriamiento disminuye la presion interior y el mercurio sube poco á poco por la ampolla llenándola parcialmente. Si se enderezara el tubo, el mercurio permaneceria en la ampolla sin poder penetrar en el recipiente, á causa del reducido diámetro del tubo. Pero si se tiene cuidado de calentar á la vez el tubo, el recipiente y la ampolla, poniéndolos sobre una parrilla inclinada llena de brasas (fig. 8), el aire interior se dilata y se escapa formando burbujas. Si se levanta entónces el tubo y se le

deja enfriar, el aire interior se contrae y la presion hace entrar una parte del mercurio en el recipiente. Repítese muchas veces esta operacion, hasta que por fin se hace hervir el mercurio, y el recipiente y el tubo se llenan enteramente, no conservando ya rastro de humedad ni burbuja alguna de aire.

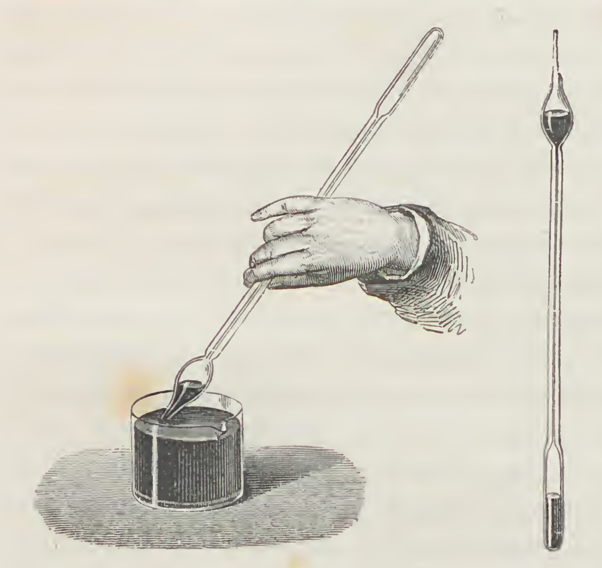


Fig. 7.—Modo de llenar de mercurio el tubo barométrico

Si se han calculado de antemano la capacidad del recipiente y la del tubo (1) para que las indicaciones del termómetro comprendan un número de grados determinado, por ejemplo 120°, entre 105° y — 15°, se hace de modo que el nivel del mercurio ocupe la parte superior del tubo cuando este está sometido á una temperatura de 105°. Se hace salir el mercurio de la ampolla, y el nivel baja un poco por enfriamiento. Calentando el extremo del tubo á la lámpara de esmaltar, se le adelgaza, se separa la ampolla limándola y se calienta de nuevo el tubo á 105°. El mercurio se escapa en finas gotitas, y cuando ya no sale más, se cierra la punta del tubo al soplete. En tales condiciones, queda éste absolutamente privado de aire, y cuando el mercurio baja por efecto del enfriamiento, el espacio que deja sobre su nivel es igual al vacío barométrico.

Los detalles, un tanto minuciosos en que acabamos de entrar, no solamente se encaminan á dar las indicaciones convenientes á aquellos de nuestros lectores que quisieran construir por sí mismos un termómetro un poco exacto, sino que, al enumerarlos, nos ha guiado el objeto de hacer comprender la necesidad, impuesta por los progresos de la ciencia, de que no se descuide ninguna de las condiciones de la más rigurosa exactitud en las manipulaciones de física. En un principio, fuerza fué contentarse con aproximaciones á menudo groseras; lo cual bastaba

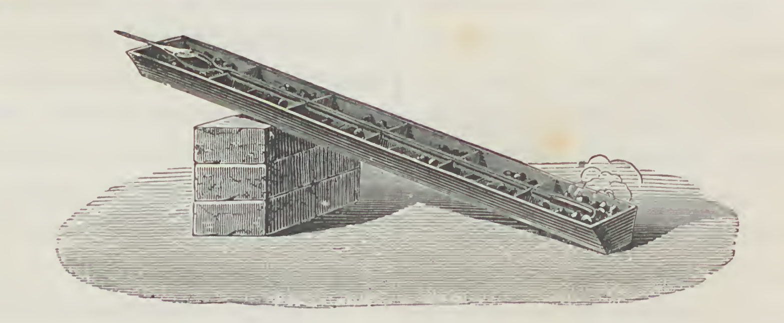


Fig. 8.—Modo de introducir el mercurio en el depósito

para el estudio de los fenómenos más generales y para la determinacion de sus leyes. Así como en astronomía el conocimiento de las más insignificantes perturbaciones de los movimientos de los cuerpos celestes hubiera podido ser causa de que se ignoraran las leyes á que obedecen estos movimientos en su conjunto, así tambien en física hubiera sido supérfluo, perjudicial tal vez, empeñarse en conocer medidas de una exactitud que no se avenia con el estado de la ciencia. Hoy, por el contrario, es de rigor esta exactitud, porque es la condiccion y la prenda de futuros descubrimientos. Siendo el termómetro uno de los instrumentos más preciosos de los laboratorios de física ó de los observatorios de los fenómenos naturales, hemos aprovechado la ocasion de su descripcion para dar una idea de la rigorosa precision con que se construyen actualmente.

(1) La dilatacion aparente del mercurio en el vidrio es de $^1/_{6480}$ por 1 grado centígrado. Para 120 grados, la capacidad interior del tubo deberá ser por lo ménos $\frac{120}{6480} = \frac{1}{54}$ de la de l recipiente. Se adopta un número algo mayor, $\frac{1}{50}$ por ejemplo, que comprende 129°,6.

Digamos ahora algo acerca de la última operacion que nos resta por describir, la de la graduacion del instrumento.

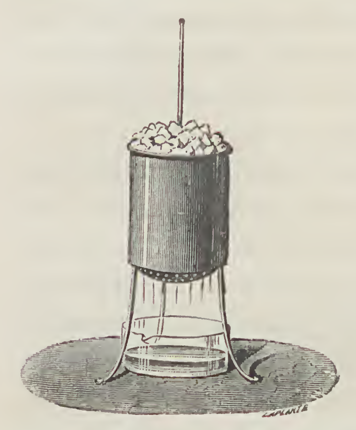


Fig. 9.—Determinacion del cero del termómetro de mercurio: temperatura de la fusion del hielo.

Hemos dicho ya que esta graduacion está basada enteramente en la constancia de dos fenómenos: uno, la fusion del hielo, que va á darnos el cero ó punto de partida de la escala termométrica; otro, la ebullicion del agua pura al aire libre, ó mejor dicho, el vapor que se escapa de ella, á la presion exterior ó barométrica de 760 milímetros, la cual da una segunda temperatura fija que se ha convenido en designar en grados con el número 100. Veamos cómo se obtienen prácticamente estos dos puntos fijos en el tubo del termómetro debidamente lleno de mercurio.

Empiézase por determinar el cero. Para ello se introduce el recipiente ó depósito y una parte del tubo en una vasija llena de hielo machacado, y agujereada en su parte inferior á fin de que salga libremente el agua de fusion, que podria adquirir una temperatura más alta que la del hielo fundente (fig. 9). Cuando queda fijo el nivel del mercurio en el tubo, se hace una señal en la parte exterior de éste á la misma altura de dicho nivel, y así se tiene el *cero* de la graduacion.

En seguida se coloca el termómetro en la posicion indicada en la fig. 10, es decir, en un baño en el que se le sumerge enteramente en

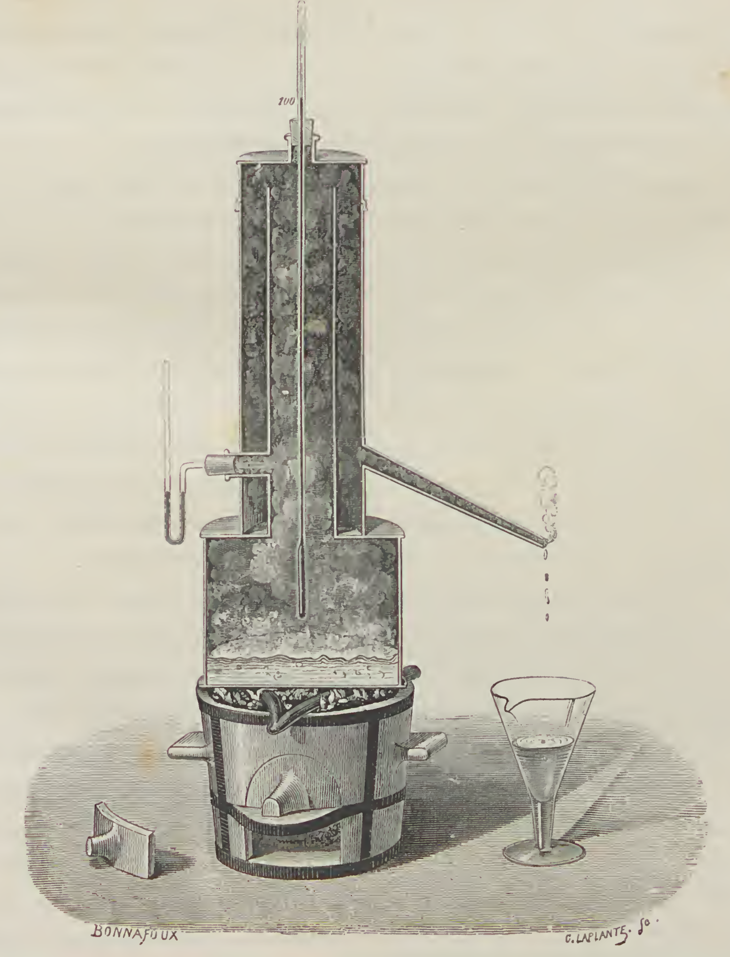


Fig. 10—Determinacion del punto 100, temperatura de la ebullicion del agua á 760 milímetros de presion

vapor de agua hirviendo; este baño se compone de una doble caja de palastro, por la cual circula el vapor ántes de perderse en la atmósfera, de suerte que el enfriamiento exterior no modifica la temperatura de la capacidad interna. Espérase que el nivel del mercurio, observado fuera del baño, adquiera fijeza, y se hace otra señal en el tubo. En este punto

se inscribe el número 100, si, como hemos dicho, la presion barométrica es de 760 milímetros en tal momento (1). El manómetro de brazos corvos, que se ve á la derecha del aparato, indica por la igualdad de nivel del líquido si la presion es la misma dentro que fuera del baño, presion que se observa con el barómetro, y si es mayor ó menor que 760 milímetros, se hace la correccion de que hablamos en la nota que va al pié.

En el caso de que el interior del tubo sea perfectamente cilíndrico, de lo cual es fácil cerciorarse ántes de soldar á él el recipiente del termómetro, es evidente que si se divide en 100 partes de igual longitud el espacio que media entre el cero del hielo fundente y el punto 100 que corresponde á la temperatura de la ebullicion del agua, cada una de estas partes indicará capacidades iguales, y cuando el nivel del mercurio las recorra sucesivamente, dilataciones iguales del líquido. Estas divisiones, llamadas *grados*, forman la escala de las temperaturas, escala que se prolonga tambien á más de 100° grados y á ménos de 0°, para medir temperaturas más bajas que la del hielo fundente y más altas que la del agua hirviendo. Unas veces se graban estas divisiones en el tubo, otras en un tubo lateral soldado al primero, y otras por fin en la tablilla en que se fija el instrumento (fig. 11).

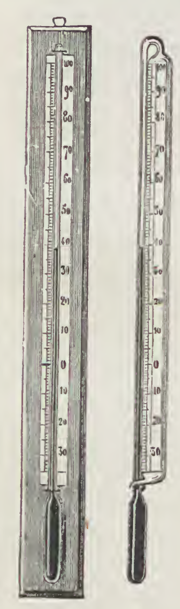


Fig. 11. — Termómetros centígrados con sus escalas graduadas

La division en 100 partes equidistantes del intervalo 0° á 100° se hace con la máquina de dividir. Entremos en algunos detalles acerca de este punto.

La figura 12 representa una de estas máquinas segun el modelo del inteligente constructor Duboscq. Compónese esencialmente de un tornillo micrométrico de acero, cuyo paso ó distancia entre dos filetes consecutivos es en todas partes igual á 1 milímetro. Este tornillo, encajado en sus dos extremos entre dos collares fijos, puede girar sobre un eje, pero no avanza ni retrocede jamás por sí mismo.

El movimiento de rotacion del tornillo comunica á una tuerca que lo abarca y que lleva una placa metálica ó carro, un movimiento de progresion que lo hace avanzar ó retroceder por un banco de hierro provisto de carriles, segun que el tornillo dé vueltas en un sentido ó en el opuesto. Este movimiento de progresion comprende tantos milímetros y fracciones de milímetro como vueltas ó fracciones de ellas se hagan dar al tornillo; un manubrio sirve para este objeto, y con un índice se cuentan las fracciones de vuelta en un círculo dividido, centrado en el eje del tornillo y que forma la cabeza de este. Siendo las divisiones del círculo en número de 400, cada una de ellas corresponde á un retroceso ó á un avance de la 400.ª parte de un milímetro.

Colócase el tubo que se ha de dividir sobre el carro, sujetándolo á él. En una pieza fija hay un buril que consiste en un punzon de acero ó bien en una punta de diamante, segun que se hayan de marcar las divisiones sobre algun barniz ó sobre el tubo de vidrio, de suerte que la punta de dicho buril conserva una posicion invariable con relacion á la longitud del tornillo, pero se mueve en el plano vertical que corresponde á esta posicion, pudiéndosele subir ó bajar como se quiera.

Se empieza por hacer ocupar al carro dos posiciones sucesivas tales que la punta del buril coincida exactamente ante todo con el punto *cero* del tubo y luégo con el punto 100. Esta maniobra da exactamente la longitud del intervalo comprendido entre los dos puntos, si se ha contado el número de vueltas y la fraccion de vuelta dadas por el tornillo. Supongamos que hayan resultado 72 vueltas completas, más 100 divisiones; la distancia total entre los puntos fijos será en este caso igual á 172mm,25, que corresponden á 68,900 divisiones micrométricas. Cada grado deberá tener 1mm,7225 que corresponden á 689 divisiones, es decir, á una vuelta entera más 289 divisiones. Por consiguiente

(1) Si en el momento del experimento la presion barométrica no es de 760mm, el nivel del mercurio no indicará el punto fijo en que se debe marcar 100°. Se ha reconocido que la diferencia era de 1 grado centígrado (ó sea la 100.ª parte de la dilatacion total entre el punto de fusion del hielo y el de ebullicion del agua) para una presion que difiere 27mm en más ó en ménos de 760mm, de suerte que será preciso marcar 101° si la presion es de 787mm, y 99° si por el contrario es tan sólo de 733mm. Entre estos límites, se hace una correccion proporcional al exceso ó al defecto de presion. Por ejemplo, si la presion es de 768mm, la temperatura correspondiente deberá ser $100° - \frac{8}{27} = 99°,70$. Si de 795mm, se deberá marcar una temperatura de $100° + \frac{8}{27} = 100°,30$.

habrá que mover el carro de modo que se haga avanzar sucesivamente la longitud de un grado, dando al manubrio una vuelta entera y 289 divisiones. Cada vez que baje la punta, marcará en el tubo una division.

En caso de que el calibre del tubo del termómetro no sea perfectamente regular, ántes de llenarlo como hemos dicho, habrá que dividirlo en partes de capacidad igual, lo cual se consigue introduciendo una corta cantidad de azogue á la que se hace ocupar sucesivamente, y unas á continuacion de otras, partes del tubo cuyos extremos se marcan. Las longitudes de estas partes son desiguales, pero sus volúmenes iguales. Una vez lleno el tubo y determinados los puntos fijos, se podrá calcular fácilmente el valor en grados de una de dichas partes, y por consiguiente la longitud del grado en cada una de ellas. Hechos estos cálculos, la máquina de dividir servirá para completar la graduacion, como más arriba queda dicho.

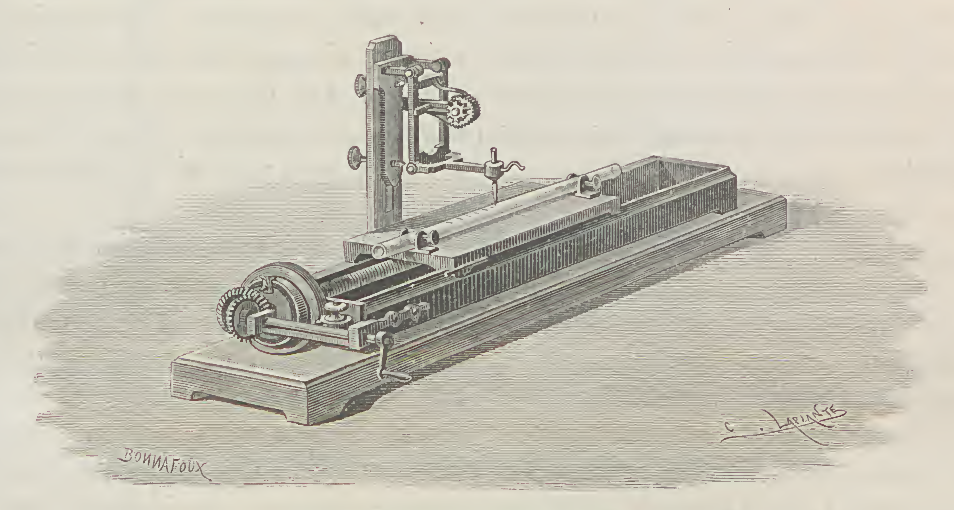


Fig. 12.—Máquina de dividir de Duboscq

Es obvio que cuanto precede se aplica á la prolongacion de las divisiones del tubo termométrico bajo cero y más allá del punto fijo 100. Por último, habrá que hacer las mismas operaciones para la division del termómetro de alcohol, con la única diferencia de que en este caso el número de divisiones sobre 0° no pasa por lo comun de 75, por cuanto el alcohol hierve á la temperatura de 78° centígrados (1).

La construccion y graduacion de este último termómetro exigen ciertas precauciones especiales de las que diremos algo. El tubo se elige del mismo modo que para el termómetro de mercurio; sólo que como el alcohol, entre 0° y 100°, se dilata unas siete veces más que el mercurio, el tubo, á igualdad de volúmen del depósito, debe tener un diámetro mucho mayor que el del destinado á aquel termómetro. La precaucion que se debe tomar para elegir el líquido se refiere principalmente á la pureza y homogeneidad del alcohol, que debe ser absolutamente anhidro. Para hacer más visibles las indicaciones de nivel, se acostumbra colorar el alcohol con orchilla; pero, segun observa Mr. Buignet, «esta es una adicion que debe efectuarse con parsimonia, y hasta prescindir de ella en los termómetros de precision. La materia colorante, introducida así en el alcohol, sufre siempre al cabo de más ó ménos tiempo una descomposicion particular cuyo efecto inmediato es depositar un producto insoluble en el vidrio, y perjudicar el movimiento regular del líquido.» Para introducir el alcohol en el tubo se procede poco más ó ménos como con el mercurio.

Hecho esto, se determina el cero sumergiendo el recipiente en una vasija llena de hielo. Tómase por segundo punto fijo 50° por ejemplo, y se obtiene la posicion de este punto en el tubo por comparacion con un termómetro de mercurio, metiendo los dos tubos en un mismo baño que se calienta á 50° con un mechero de gas convenientemente regulado, no restando ya sino marcar las divisiones en el tubo.

Los termómetros de mercurio y alcohol, cons-

(1) Es la temperatura de la ebullicion al aire libre. En el interior del tubo barométrico, el alcohol puede pasar de 78° sin hervir: porque la atmósfera de vapor que se desprende del líquido se opondria á la ebullicion. Esto explica cómo ha podido graduar Deluc un termómetro de alcohol, tomando por segundo punto fijo el agua hirviendo ó los 80° Réaumur.

truidos con las precauciones que acabamos de describir en detalle, no son en realidad comparables ni concuerdan rigurosamente sino en los puntos fijos del hielo fundente y en los 50°. Con respecto á las temperaturas intermedias como para con las que las exceden en más ó en ménos, no hay ya concordancia, lo cual depende de la irregularidad de la dilatacion del alcohol. Más adelante volveremos á ocuparnos de tan importante punto.

IV

DIFERENTES ESCALAS TERMOMÉTRICAS

La escala centesimal no ha sido la única empleada para graduar los termómetros; pero es la más generalmente admitida, y la única adoptada hoy en Francia y en otros muchos países. Discurrióla el sabio sueco Celsius, quien propuso su adopcion en 1741. La escala de Réaumur, casi desechada ya, dividia en 80 grados el intervalo entre los dos mismos puntos fijos, esto es, el de la temperatura del hielo fundente y el de la ebullicion del agua. Mediante un cálculo sencillísimo se puede convertir en *grados centígrados* una temperatura expresada en *grados Réaumur;* basta añadir al número dado su *cuarta parte:* por ejemplo, 28° R valen 28 + 7° ó sea 35° C. Si de una temperatura centígrada se resta el quinto, se tendrá la misma temperatura expresada en grados Réaumur: verbigracia, 35° C equivalen á 35 — 7° = 28° R : 32° C equivalen á 25°,6 R.

En la escala Fahrenheit, usada en Inglaterra, Alemania y Estados Unidos, uno de los puntos fijos es el de la ebullicion del agua, así como en las escalas anteriores; pero el otro corresponde á una temperatura más baja que la del hielo fundente y que resulta de una mezcla de hielo y de sal amoniaco (1). El cero es pues más bajo; en el punto de ebullicion del agua Fahrenheit marcó 212°. Como se ha visto que la temperatura del hielo fundente correspondia al grado 32.° de esta escala, resulta que los 100° de la centígrada corresponden á 180° Fahrenheit; siendo por consiguiente fácil trasformar un número cualquiera de grados de una de estas escalas en el otro. Si se desea averiguar, por ejemplo, cuál es en grados centígrados el equivalente de 120 F, se empieza por restar 32, lo cual da 88, y de esta cantidad se toman los $^5/_9$, resultando 46°,66 C. Por el contrario, supongamos que se quiere convertir en grados Fahrenheit la temperatura 45° C; para esto se la multiplica por $^9/_5$ lo cual da 81° sobre el hielo fundente, ó sea sobre 32° segun ántes hemos dicho: 81° + 32° ó 113° F será pues el resultado de la trasformacion.

Tambien se usa, especialmente en Rusia, la escala Delisle, que marca 0° en el punto de ebullicion, y 150° en el del hielo fundente. Es muy sencillo trasformar una temperatura de esta escala en alguna de las otras tres. Por ejemplo, 45 grados Delisle equivalen á 30 centígrados, pero hay que deducirlos de 100, puesto que la lectura se hace en sentido inverso. Tendremos pues: 45° D = 70° C = 56° R = 158° F. Para ahorrarse estas trasformaciones, que no por lo fáciles dejan de ser muy enojosas cuando se multiplican, seria muy conveniente que los físicos y meteorologistas de todos los países conviniesen en adoptar una sola escala termométrica.

Cuando se anuncia una temperatura refiriéndose á cualquiera de estas graduaciones, hay que tener cuidado de expresar si es mayor ó menor que la marcada por el cero. Así lo hacen los físicos considerando las temperaturas más altas que 0° como *positivas* y poniendo delante de ellas el signo +. Las inferiores á 0° son *negativas,* y se les antepone el signo —. De la adopcion de estos signos resultan para las operaciones que se han de efectuar con los números que expresan las temperaturas, cuando se los combina sumándolos ó restándolos, reglas parecidas á las de las cantidades algebráicas positivas ó negativas. Pero conviene dar á todos estos números su verdadera significacion, y no atribuirles un valor absoluto del que carecen. Así por ejemplo, no se puede decir que una temperatura es doble ó triple que otra, ó por lo ménos, si se emplean estas expresiones, no debe deducirse de ellas nada acerca de las cantidades de calor que les corresponden. Esto significa sencillamente que la dilatacion del mercurio, sobre el punto fijo tomado por punto de partida ó cero, es en este caso doble ó triple de la dila-

(1) Fahrenheit habia tomado para cero de su escala ó para punto de partida de su graduacion esta temperatura que no corresponde á un fenómeno físico fijo, porque era la del frio más intenso observado en Dantzig ántes de 1714.

tacion total correspondiente á la segunda dilatacion de temperatura. En una palabra, hay que recordar que la unidad de temperatura, el grado centígrado en la escala centesimal por ejemplo, representa una dilatacion del mercurio contenido en el recipiente de un termómetro igual á la centésima parte de la dilatacion total que experimentaria el mismo líquido al pasar de la temperatura del hielo fundente á la del agua hirviendo. Nada más.

Fig. 13. - Escalas termométricas

V

VARIOS TERMÓMETROS. — COMPARACION CON LOS DE MERCURIO Y DE AIRE

El mercurio y el alcohol no son los únicos líquidos con los cuales han construido termómetros los físicos. Deluc, físico de fines del siglo pasado, comparó las indicaciones dadas por termómetros construidos y graduados separadamente, y llenos de los cuatro líquidos siguientes: mercurio, alcohol, aceite de oliva y agua. Los dos últimos sólo podian dar temperaturas superiores á la de la fusion del hielo. Hé aquí los resultados, en grados Réaumur, obtenidos por dicho sabio:

Term. de merc...	— 10°	— 5°	0	20°	40°	60°	80°
— de aceite..	»	»	0	19,3	39,2	59,3	80
— de alcohol	— 7,7	— 3,9	0	16,5	35,1	56,2	80
— de agua....	»	»	0	4,1	20,5	45,8	80

Los puntos fijos 0° y 80° son idénticos; y así debia ser, por cuanto habian sido los puntos de partida para la graduacion. Pero las diferencias de las temperaturas intermedias son muy perceptibles, viéndose que son muy considerables por lo que hace al agua. De las investigaciones hechas de 1846 á 1852 por M. I. Pierre sobre la dilatacion de un gran número de líquidos, resulta que los termómetros más parecidos á los de mercurio son los que se llenan de sulfuro de carbono, de alcohol, de éter comun, y de cloruro y bromuro de etilo. Como la temperatura de ebullicion de estos líquidos es respectivamente de 48°, 78°, 35°,5, 11° y 40°,7, los termómetros así construidos no podrán servir sino para marcar temperaturas bajas. El agua es la que produce mayor discordancia con las indicaciones del termómetro de mercurio.

Vése pues cuánto distan de ser comparables entre sí los aparatos termométricos basados en la dilatacion de líquidos diferentes, por más que estén graduados á partir de los mismos puntos fijos. Colocados en idénticas condiciones térmicas, en medios que, segun nuestra definicion, tengan la misma temperatura, será desigual el número de grados que marcasen; en cambio, podian marcar los mismos grados sin que las temperaturas fuesen iguales. Ante estas dificultades, se ha tratado de averiguar si habia alguna sustancia, líquida ó gaseosa, que pudiese dar indicaciones comparables entre sí cuando se toman sus variaciones de volúmen como medida de las de temperatura. En otros términos, se ha planteado la cuestion siguiente: ¿Hay algun cuerpo cuyas dilataciones sean proporcionales á las cantidades de calor que las producen, ó si no existe alguno que goce en absoluto de esta propiedad, cuál es el que se aproxime más á ella?

Desde 1723, Taylor estudió la cuestion por lo que respecta á los líquidos. Tomando dos masas iguales de agua á temperaturas diferentes, marcadas por el termómetro de experimentos, las mezclaba adoptando las precauciones convenientes para evitar las pérdidas de calor. Conforme lo veremos más adelante, la mezcla debia estar á una temperatura media entre las extremas, á 15° por ejemplo si las masas mezcladas estaban á 20° y á 10°. Los experimentos de Taylor, repetidos posteriormente por varios sabios, han probado que el termómetro de mercurio llena esta condicion hasta á 200°. Pasado

este límite, las indicaciones son demasiado altas, de lo cual se deduce que entónces se necesita menor cantidad de calor para producir la misma dilatacion.

Fundándose más adelante Dulong y Petit en estas diferencias entre las dilataciones y los calores absorbidos, áun empleando el mercurio, y en la idea de que dilatándose por igual todos los gases entre temperaturas dadas, su dilatacion es independiente de la naturaleza de sus moléculas y de su accion recíproca, y depende exclusivamente de la cantidad de calor absorbida, consideraron el termómetro de aire preferible á todos los demás, y propio para emplearlo exclusivamente en las averiguaciones científicas de la temperatura. Cuando nos ocupemos de la medida de la dilatacion de los gases, diremos algo acerca de la construccion del termómetro de aire y de su uso, y veremos que sus ventajas teóricas sobre el termómetro de mercurio no son tan grandes como Dulong y Petit lo creyeron á la sazon.

Por ahora, limitémonos á decir que los termómetros de mercurio concuerdan notablemente con el de aire á ménos de los 100°. Sobre éstos, marcan constantemente una temperatura más elevada; á los 200°, el adelanto está comprendido entre 0°,5 y 2°; varía de 4 á 10° cerca de la ebullicion del mercurio, es decir, hácia los 360°. Como el uso del termómetro de mercurio es mucho más cómodo que el del de aire, se puede utilizar el primero para las investigaciones más exactas hasta 100 y más grados, si se ha comparado préviamente con el termómetro de aire las indicaciones del termómetro empleado.

¿Son comparables entre sí todos los termómetros de mercurio construidos como hemos dicho? Colocados en idénticas condiciones físicas, ¿marcarán todos ellos exactamente la misma temperatura? Plantear esta cuestion equivale á preguntar si el vidrio de que está formado el tubo ejerce alguna influencia en las indicaciones termométricas. Sábese en efecto que la dilatacion aparente del mercurio, la diferencia entre la dilatacion absoluta de este líquido y su envolvente, es la que sirve para definir la unidad termométrica, el grado. Siendo el mercurio perfectamente puro, su dilatacion no cambia, pero la del vidrio difiere de un termómetro á otro, segun la composicion y el estado molecular de esta sustancia. Las diferentes especies de vidrio no se dilatan con la misma igualdad, variando de una á otra la ley de esta dilatacion con la temperatura. Por último, cuando á un mismo vidrio se le ha sometido á ciertas temperaturas, sufre en su estructura molecular una modificacion que cambia la capacidad del recipiente y produce una desviacion en los puntos fijos.

De los estudios hechos por V. Regnault ha resultado que la naturaleza química del vidrio ejerce gran influencia en las temperaturas que exceden de 100°. Tampoco hay rigorosa concordancia de 0° á 100° entre las indicaciones de dos termómetros de mercurio, uno de ellos construido con vidrio comun y otro con cristal de base de plomo. Hé aquí algunas cifras sacadas de los datos de Regnault:

Temperatur del termometro de aire	TERMOMETRO DE MERCURIO			
	de cristal	de vidrio	de vidrio verde	de vidrio de Suecia
100°	100°	100°	100°	100°
120	120 12	119 25	120 08	120 04
140	140 29	139 84	140 21	140 11
160	160 52	159 74	160 40	160 20
180	180 80	179 63	180 60	180 33
200	201 25	199 70	200 80	200 50
220	221 82	219 80	221 20	220 75
240	242 55	239 98	241 60	241 16

La comparacion de estas cantidades demuestra que los termómetros de vidrio comun son los que ofrecen menores diferencias con las indicaciones del termómetro de aire; que los de cristal son los ménos á propósito, sobre todo para altas temperaturas, pues pasados los 240° va creciendo la discordancia, y que, miéntras al llegar á los 350°, un termómetro de vidrio marca 354°, uno de cristal da 360°,50, ó sea 10 grados y medio más que la verdadera temperatura. Para obviar estos inconvenientes, se necesita construir los termómetros con la misma clase de vidrio, si se quiere tener resultados comparables. En los estudios que requieran precision se hace uso del termómetro de aire, ó si se prefiere el de mercurio por su comodidad, se le compara préviamente con aquel y se forma una tabla (ó bien se construye una curva) mediante la cual se rectifiquen sus indicaciones.

Ocurre otro fenómeno, que se observa de vez en cuando, y que es capaz de alterar las indicaciones del termómetro; consiste en el cambio de lugar del cero, que sube gradualmente más allá del punto marcado en la escala al construirlo. Esta elevacion, que es comun al otro punto fijo y por consiguiente á todos los grados de la escala, ha sido observada desde 1823 por Flaugergues en Francia y por Bellani en Italia, y segun Despretz, puede continuar por espacio de cuatro ó cinco años. Por lo demás, las variaciones de los puntos fijos de un termómetro de mercurio pueden resultar de las de temperatura que experimenta cuando se desvian mucho en más ó en ménos de la temperatura media. Una muy baja hace subir el cero; si la temperatura sube á 100° obsérvase una depresion; y por último, cuando es muy alta, su consecuencia es la elevacion de los puntos fijos. Si el termómetro ha subido hasta 100°, la depresion temporal del cero no pasa de algunas décimas de grado. Si por el contrario ha estado sometido bastante tiempo á una alta temperatura, nótase una elevacion considerable. Citemos algunos casos: Habiendo calentado Person á 440° tres termómetros, su punto cero subió á 12°, 15° y 17°. Los señores Deville y Mascart calentaron tres termómetros por espacio de otras tantas horas á 166°, 206° y 266° y vieron que los ceros subian á 11°,4, 12°,5 y 13°,5.

M. Crafts ha hecho recientemente algunos estudios acerca de este asunto, convenciéndose de que la naturaleza del vidrio influye en la rapidez y en la extension de la desviacion; que el punto cero, desviado por la accion prolongada de una alta temperatura, tiende á quedar fijo en su nueva altura, y que el termómetro es más estable bajo la influencia del calor á toda temperatura inferior.

¿Cuál es la causa de estas variaciones? Al pronto creyóse poder atribuirlas á la accion de la presion exterior, que obrando á la larga sobre el recipiente, lo comprimia y disminuia su capacidad; pero ciertos experimentos hechos con termómetros de tubo abierto han dado los mismos resultados, lo cual prueba que la presion no es la causa del fenómeno. Por otra parte, tampoco puede bastar para explicar la depresion y la elevacion transitoria del cero. En cambio, todo queda explicado si admitimos con Despretz que un cuerpo sólido cuyas moléculas hayan sufrido alguna desviacion por una causa mecánica ó física, y cuyo volúmen, por ejemplo, haya disminuido ó aumentado de un modo más ó ménos considerable por efecto de una fuerza cualquiera, conserva más ó ménos tiempo el mismo volúmen cuando esta fuerza ha cesado de obrar. Por la insuflacion se han separado las moléculas del depósito termométrico; la ebullicion del mercurio despues de llenar el termómetro produce parecido fenómeno. Vuelto el vidrio del depósito á temperaturas inferiores, recobra muy poco á poco su estado molecular primitivo; sin embargo, á la larga se contrae como por especie de temple debido al enfriamiento, la capacidad del depósito disminuye, lo cual explica la elevacion gradual de los puntos fijos. Exponiéndolo en seguida á temperaturas elevadas, la accion del calor favorece de nuevo el regreso de las moléculas á su posicion normal, y se observa otra elevacion de los puntos fijos; mas, conforme se obtienen estos efectos, si el enfriamiento se efectúa con mucha lentitud, restablécese el equilibrio, y dichos puntos son más estables. La escasa depresion transitoria observada cuando se calienta el termómetro á 100° proviene de que la capacidad del depósito que por tal manera ha aumentado recobra muy poco á poco su volúmen normal. Por último, la misma causa demuestra por qué suben tambien los puntos fijos cuando se ha sometido el termómetro á un frio prolongado; el depósito contraido no recobra en seguida su volúmen primitivo.

La sensibilidad de un termómetro puede entenderse, ya relativamente á la rapidez con que adquiere la temperatura de los medios en que se le introduce, ó ya á la presion con que marque las más pequeñas fracciones de grado, es decir, con que indique insignificantes variaciones de temperatura. Para obtener la primera de estas dos cualidades esenciales importa que la masa del mercurio del depósito sea todo lo reducida posible, ó por lo ménos su superficie la mayor que se pueda con relacion á su volúmen. De esto resultan dos ventajas: que el termómetro adquiere rápidamente la temperatura del cuerpo con el que se le pone en contacto; y que no modifica sino de una manera insensible esta

misma temperatura. Consíguese este resultado dando al depósito una forma cilíndrica prolongada (la esférica es la ménos favorable); á veces se retuerce en espiral el depósito para que, teniendo una gran superficie, su longitud sea escasa.

Cuanto más pequeño es el depósito, más reducido debe ser el diámetro interior del tubo, para que la segunda especie de sensibilidad sea mayor. En este caso suele suceder que la columna de mercurio es tan sumamente fina que se necesita apelar á un anteojo de aumento para observar su nivel. A fin de hacerla más aparente se construyen tubos cuya seccion es una elipse alongada en vez de un círculo, sin aumentar su superficie; la columna mercurial, vista así en su mayor anchura, se distingue más fácilmente. Obtiénese el mismo resultado aplicando al tubo una faja de esmalte que forma un fondo blanco, opaco, sobre el cual se proyecta y se percibe claramente el extremo de la columna líquida.

Los termómetros que son bastante sensibles para que la longitud de sus grados permita dividirlos en décimas, habrian de tener dimensiones exageradas y su uso seria muy incómodo si comprendieran toda la longitud de la escala termométrica. Se subsana este defecto construyendo series de termómetros, cada uno de los cuales ha sido graduado, por comparacion con un termómetro tipo, para un corto número de grados de la escala: tales son los *termómetros de escalas fraccionadas*. Con diez termómetros de esta clase, que comprendan respectivamente 20 grados, de 0° á 20, de 10 á 30, de 20 á 40, etcétera, se podrá medir toda una temperatura comprendida entre 0° y 110°. En cada caso particular, se hará uso del que comprenda los límites probables de la temperatura que se ha de observar. Fabrícanse algunos cuya escala es todavía ménos extensa; para la práctica médica basta por ejemplo un termómetro que dé la temperatura entre 34° y 40°.

Dase el nombre de termómetro *metastático* al construido de modo que sus indicaciones, sin dejar de permitir la observacion de pequeñas fracciones de grado, como décimas ó centésimas, reunan las ventajas de la serie de termómetros de escalas fraccionadas de que acabamos de tratar. La escala de un termómetro metastático sólo comprende un corto número de grados; pero el valor absoluto de sus indicaciones puede cambiar á beneplácito del observador, como si se pudiera trasladar los puntos fijos á un punto

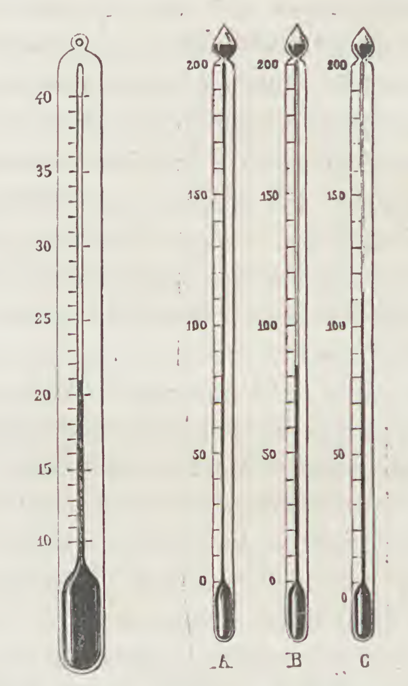


Fig. 14.—Termómetro de escala fraccionada

Fig. 15.—Termómetros metastáticos

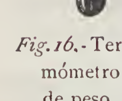
cualquiera del tubo. Su depósito es muy pequeño, y el tubo de un calibre interior bastante fino para que, al variar la temperatura, por poco que sea, la columna mercurial recorra toda su longitud. El instrumento contiene la cantidad de mercurio suficiente para que, áun dada la temperatura más baja que se quiera medir con él, el líquido llene el depósito, el tubo entero y una parte del recipiente globular soldado al extremo superior y que comunica con el tubo por un angosto orificio. Este último está dividido en partes iguales de longitud arbitraria, 200 por ejemplo.

Cada vez que se necesite hacer uso del termómetro, hay que regular su marcha, de modo que el nivel esté siempre comprendido en el límite de las temperaturas que se trata de determinar, por ejemplo, entre 15° y 25°. Entónces se le mete en un baño de una temperatura constante algo superior á 25°; tan luégo como se obtiene el equilibrio, se le saca, y cuando empieza á enfriarse, se da al tubo una sacudida brusca que separa la columna mercurial del mercurio del recipiente globular en el punto en que aquella comunica con este. A partir de tal momento, el mercurio del recipiente permanece

en él contrayéndose, y queda el termómetro preparado para las observaciones que se hayan de hacer en los límites requeridos. Entónces sólo será preciso conocer: 1.º cuál es el valor de una de las divisiones de la escala en grado ó fraccion de grado; 2.º á qué grado del termómetro tipo corresponde una de ellas. Lógrase esto poniendo el termómetro metastático en el mismo baño que aquél, y anotando el grado marcado por el primero con la division correspondiente. Dejando luégo que el baño se enfrie un grado, una nueva lectura dará todos los elementos de la cuestion.

Como se ve, estas operaciones son bastante largas y delicadas, pero hay que tener en cuenta que son necesarias cuando se trata de averiguaciones precisas, de determinaciones rigurosas que requieren una aproximacion de la temperatura en décimas y hasta en centésimas de grado centígrado. En las observaciones ordinarias, se hace uso de los termómetros comunes de mercurio ó de alcohol.

En las investigaciones de física se emplea á veces un aparato termométrico que difiere del termómetro de mercurio en que no tiene tubo ni necesita graduacion: es el *termómetro de peso*, formado de un grueso depósito cilíndrico soldado á un tubo corto, dos veces acodado en ángulo recto y con su extremo aguzado y presentando una abertura capilar (fig. 16). Se pesa el tubo vacío, y luégo se le llena de mercurio que se purga por ebullicion, despues de lo cual se le mete entre hielo en fusion manteniendo el orificio en mercurio bien purificado. El instrumento se llena así de este último líquido á 0°; se le pesa en tal estado, y la diferencia con el peso del tubo vacío da el del mercurio solo á 0°. Hecho esto, se lleva el aparato á un baño de temperatura conocida y constante, cuidando de recoger el mercurio que la dilatacion hace salir por el orificio. Se pesa por último el mercurio salido; siendo evidente que este último peso referido al del mercurio restante, es decir $\frac{p}{P-p}$, representa la dilatacion total aparente del mercurio respecto del número de grados que expresa la temperatura del baño t. Dividiendo este número por t se tendrá la dilatacion para un grado, ó la aparente del mercurio en el vidrio del tubo para la unidad de volúmen y para un grado. Conocido este elemento, y empezando de nuevo la operacion que acabamos de describir, se podrá averiguar recíprocamente la temperatura desconocida del baño en el que se introducirá el aparato.


Fig. 16.- Termómetro de peso

La principal ventaja del termómetro de peso consiste en la escasa longitud de su tubo, que permite sumergirlo enteramente en los medios cuya temperatura se desea conocer. Además, de este modo se evitan los errores de graduacion; pero las operaciones son más largas y requieren balanzas más exactas.

VI

TERMÓMETROS DIFERENCIALES, METÁLICOS, DE MÁXIMA Y DE MÍNIMA

Los aparatos que acabamos de describir, juntamente con el termómetro de aire de que trataremos despues, son los únicos usados en las investigaciones precisas de los laboratorios de física y cuando se han de determinar temperaturas absolutas. Cuando se trata de comprobar rápidas variaciones de temperatura, valuar simples diferencias ó saber á qué temperaturas extremas ha estado sometido un medio durante un espacio de tiempo dado, se emplean varios instrumentos que vamos á describir someramente.

Atribúyese á Galileo y á Cornelio Drebbel la invencion de los primeros termómetros de aire, que á decir verdad no eran más que simples termoscopios. Uno de ellos (fig. 17) consiste en un tubo de recipiente que contiene una pequeña columna líquida A, la cual separa el aire del recipiente del aire exterior. El otro aparato está asimismo formado de un tubo de depósito de aire semejante al primero, pero cuyo extremo abierto penetra en un líquido contenido en una vasija abierta; á causa del enfriamiento, el aire disminuye de volúmen, y por consiguiente su elasticidad es menor, de suerte que el líquido, sometido siempre á la presion atmosférica exterior, sube más ó ménos por el tubo. Este segundo aparato fué muy usado en el siglo último. Ahora se gradúan estos dos termómetros por comparacion con uno de mercurio; márcanse los puntos en que se detiene el líquido á dos temperaturas diferentes, y se divide el intervalo en tantas partes iguales cuantos son los

grados que éste comprende. Pero como los cambios de la presion atmosférica los afectan, no son susceptibles de gran precision. Su calidad consiste sobre todo en la rapidez de sus indicaciones.

Leslie y Rumford han ideado, cada cual por su parte, termómetros fundados en la dilatacion del aire, pero que no ofrecen los inconvenientes de los anteriores, esto es, no influye en ellos la presion atmosférica. Ambos constan de un tubo

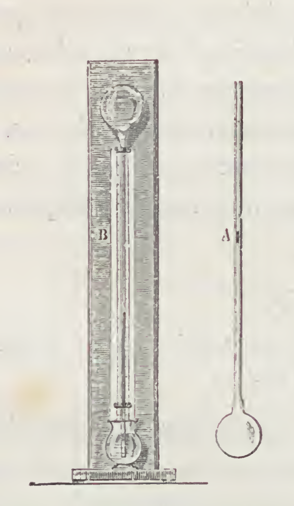


Fig. 17.—Termómetros de aire de Cornelio Drebbel y de Galileo

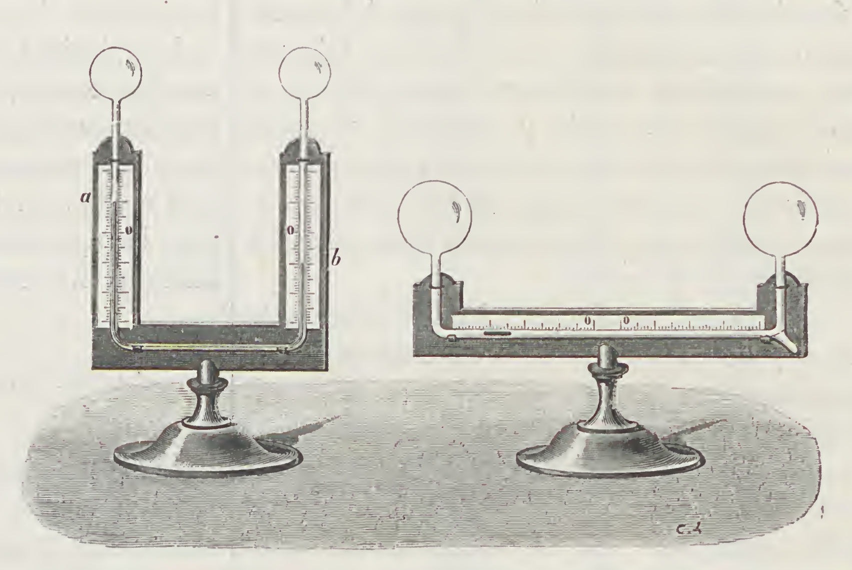


Fig. 18.—Termómetro diferencial de Leslie

Fig. 19.—Termómetro diferencial de Rumford

acodado dos veces, y terminado en cada extremo en un depósito globular. El tubo del termómetro de Leslie (fig. 18) contiene una columna líquida de ácido sulfúrico teñido de encarnado, cuyos niveles son iguales en cada brazo, cuando la temperatura de las dos bolas es igual (1). Señálase con un ◦ este nivel comun. Si se calienta entónces uno solo de ambos depósitos, la dilatacion del aire contenido en él empuja el líquido; el nivel del brazo correspondiente baja á *b* al paso que en el otro brazo sube hasta *a*; y la altura sobre cero marca la diferencia de temperatura de los depósitos, si el instrumento ha sido graduado por comparacion con un termómetro de mercurio. La eleccion del líquido que forma la columna-índice no es indiferente. Leslie se valió del ácido sulfúrico, porque no desprende vapores á las temperaturas ordinarias.

El termómetro de aire de Rumford difiere del anterior en que la columna líquida está reemplazada por un índice que ocupa la parte media del brazo horizontal del tubo cuando hay igualdad de temperatura entre los dos depósitos, siendo tambien iguales las masas de aire contenidas en cada mitad del aparato Si uno de los depósitos se calienta más que el otro, la dilatacion del aire hará que el índice se dirija por la parte horizontal del tubo hácia el lado de la bola más fria, y se dividirá la diferencia de temperaturas por el número de divisiones que dicho índice haya recorrido á partir del cero. Rumford empleaba un índice de alcohol; pero como este líquido es muy volátil, las indicaciones del aparato no ofrecian mucha seguridad, y sólo podian marcar la igualdad de las temperaturas. Le daba el nombre de *termoscopio*.

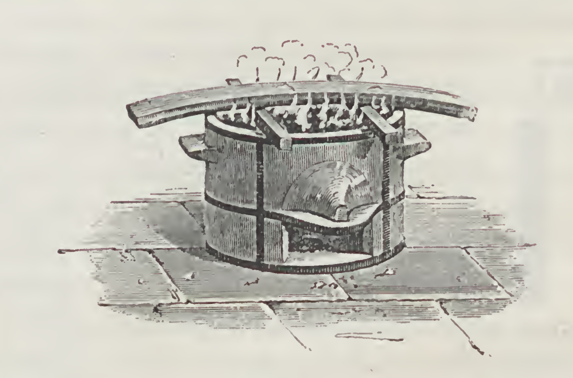


Fig. 20.—Dilatacion desigual de dos metales diferentes á una misma temperatura

Ambos instrumentos marcan así diferencias de temperatura, por lo cual se les llama *temperaturas diferenciales*. Pero pueden indicar tambien las temperaturas absolutas, en cuyo caso

(1) Esto supone que las masas de aire contenidas en los dos depósitos son perfectamente iguales, resultado que se consigue por medio de tanteos cuando se construye el instrumento.

se rodea uno de los globos de hielo fundente, lo cual mantiene su temperatura á cero.

La dilatacion de los cuerpos sólidos puede servir asimismo para medir la temperatura. Los aparatos que hemos descrito más arriba están basados en la desigualdad de dilatacion de los líquidos ó de los gases y de las sustancias que los contienen; esta desigualdad, ya sensible para con los líquidos, lo es mucho más respecto de los gases. La construccion de los termómetros metálicos representados en las figs 21, 22 y 23 está asimismo basada en la desigualdad de dilatacion de los diferentes cuerpos sólidos. Dos placas metálicas, una de cobre y otra de zinc por ejemplo, soldadas una á otra en toda su longitud de manera que formen una barra recta, se alargan con desigualdad si se eleva su temperatura; la barra se dobla entónces como lo demuestra la fig. 20, formando el zinc, como más dilatable, el lado convexo y el cobre el lado cóncavo. Al volver á la temperatura primitiva, recobra su forma rectilínea, para doblarse en sentido contrario, si se la somete en seguida á un enfriamiento.

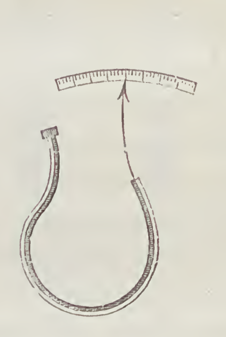
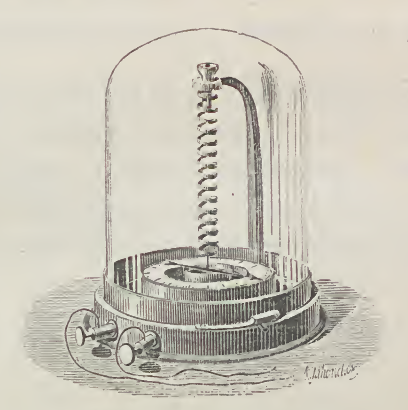

Fig. 21. — Termómetro metálico de Regnier


Fig. 22. — Termómetro metálico de cuadrante


Fig 23 — Termómetro metálico de Bréguet

El termómetro metálico de cuadrante se compone de una placa curva de cobre y acero soldados. Uno de los extremos está fijo, y el otro lleva una manecilla cuya punta puede recorrer las divisiones de un cuadrante. Tal es el termómetro metálico de Regnier (fig. 21). La extremidad movible de la doble placa se apoya tambien en el brazo menor de una palanca, cuyo brazo mayor, en forma de sector dentado, engrana en el piñon de la aguja (fig. 22). Las variaciones de la temperatura aumentan ó disminuyen la curvatura de la placa, haciendo entónces mover, en uno ú otro sentido, la palanca y por consiguiente la aguja. El cuadrante está dividido en grados por comparacion con un termómetro de mercurio.

En el termómetro metálico de Bréguet (figura 23), la placa está formada de tres láminas de plata, oro y platino, que componen una banda metálica enrollada en hélice, constituyendo la plata, como el más dilatable de los tres metales, la superficie interior de las espiras (1). La hélice está suspendida verticalmente, y de su extremo inferior pende una aguja horizontal que recorre las divisiones de un cuadrante. Si la temperatura se eleva, la curvatura de las espiras disminuye por efecto de la mayor dilatacion de la plata y la aguja marcha en un sentido; lo contrario sucede si la temperatura baja. Como la masa de la hélice es sumamente débil, se pone con gran prontitud en equilibrio de temperatura con el aire que la rodea; el termómetro de Bréguet es, pues, muy sensible, y muy á propósito para marcar las variaciones de temperatura más bruscas y ligeras.

Los termómetros de *máxima* y *mínima* son instrumentos que tienen por objeto, como lo indican sus nombres, dar á conocer, ya la temperatura más elevada, ó bien la más baja que, en un espacio de tiempo dado, haya experimentado el medio en cuyo seno se encuentran. Se usan principalmente en los observatorios meteorológicos, en donde eximen al físico de una observacion continua ó por lo ménos muy repetida.

La figura 24 representa los termómetros de máxima y de mínima discurridos por Ruther-

(1) La interposicion del oro entre los dos metales de dilatabilidad más desigual tiene por objeto evitar la rotura ó por lo ménos la separacion de las partes soldadas, accidente que podria sobrevenir si se empleara exclusivamente el platino y la plata.

ford. Los dos instrumentos, el primero de los cuales, A, es un termómetro de mercurio, y el segundo B uno de alcohol, están situados horizontalmente en una tablilla. En el interior del termómetro de máxima y en la superficie del mercurio descansa un pequeño cilindro de acero ó de esmalte, que el líquido empuja ante sí miéntras la temperatura se eleva, pero que permanece quieto en el punto más distante á que ha llegado cuando aquella llega á bajar. La base del cilindro más inmediata al mercurio indica sin duda la temperatura máxima. El movimiento

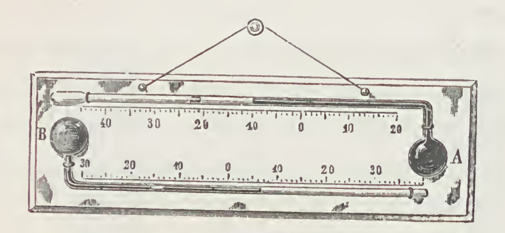


Fig. 24. — Termómetro de máxima y de mínima de Rutherford

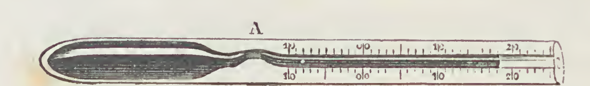


Fig. 25.—Termómetro de máxima de Negretti y Zambra

del índice miéntras la columna mercurial sube, así como su detencion cuando esta retrocede, están igualmente basados, segun se ve, en la propiedad que tiene el mercurio de no mojar el cilindro de acero, de no adherirse á su superficie, Una propiedad contraria á esta es la que ha proporcionado á Rutherford el medio de construir su termómetro de mínima. Este es, en efecto, un termómetro de alcohol en cuyo tubo hay un cilindrito de esmalte que el líquido rodea sin moverlo de su sitio cuando sube la temperatura, pero al que arrastra tras sí cuando esta baja. La base del cilindro opuesta al depósito es pues la que indica el mínimum. Cuando se quiere instalar el instrumento para hacer una observacion, hay que cuidar de hacer que el índice pase á los extremos de cada columna líquida: el uno descansa entónces sobre el mercurio, y el otro, rodeado de alcohol, asoma su base más distante del depósito por la superficie del líquido.

Tambien se hace uso, como termómetro de máxima, del instrumento representado en la figura 25. Es un termómetro de mercurio comun cuyo tubo está un tanto encorvado junto al depósito, y estrechado en A, en el punto en que, cuando el mercurio se contrae por efecto del enfriamiento, la columna situada en el tubo no puede ya penetrar en el depósito. Su extremidad queda, pues, en el punto más elevado de su ascension. En cambio, miéntras el mercurio se dilata, basta su fuerza expansiva para que el líquido del depósito pase al tubo, á pesar de lo reducido del diámetro de la parte estrechada. Este instrumento ha sido inventado por Negretti y Zambra.

El termómetro de Six, modificado por Bellani, reune en un solo aparato los termómetros de máxima y de mínima de Rutherford. Consiste en un termómetro de alcohol de gran depósito, de tubo acodado dos veces y que contiene una columna de mercurio en los dos brazos verticales del codo inferior. De este modo queda el alcohol separado en dos partes por el mercurio; en los dos niveles de este último descansan dos flotadores de hierro, que en virtud de sus movimientos y por los puntos extremos á que llegan, indican, el uno, la temperatura más baja, el otro la más alta del espacio de tiempo durante el cual se haya estado observando el instrumento.

Para observar las temperaturas máximum y mínimum á ciertas profundidades, en el agua del mar ó en los lagos y en los pozos artesianos, se usan los termómetros de version, entre los cuales describiremos los de Walferdin, los más apreciados por los físicos.

El termómetro de máxima está construido como uno de mercurio comun; pero el tubo termina en punta afilada y abierta que penetra en un pequeño depósito lateral ó *panza*, la cual contiene cierta cantidad de mercurio. Cuando se quiere hacer alguna observacion, se calienta el depósito hasta que el mercurio llene enteramente el tubo; luégo se invierte el instrumento, quedando el depósito arriba y bajando el mercurio de la panza hácia la punta; se le deja enfriar á una temperatura más baja que la de las máximas que se tengan que determinar, á pesar de lo cual el tubo continúa lleno enteramente de mercurio, por cuanto la punta sigue sumergida en el mercurio de la panza. Cebado así el

instrumento, se le coloca en el medio que se ha de observar. Miéntras la temperatura se eleva, el mercurio pasa por la punta, y en el momento del maximum el tubo quedará enteramente lleno. Al sacar el instrumento del medio, se hallará la temperatura máxima calentando el termómetro en un baño hasta que la columna de mercurio toque de nuevo el vértice de la punta.

Fig. 26.—Termómetros de máxima y mínima de Walferdin

En el termómetro de mínima, la punta está abajo, cerca del depósito, que contiene mercurio y cierta cantidad de alcohol. Cuando se quiere hacer alguna observacion, se enfria el instrumento á una temperatura inferior á la que se supone como mínima; se le invierte, y por la punta penetra en el tubo cierta cantidad de mercurio. Colocado el termómetro en el medio que se trata de observar, miéntras la temperatura baja, el índice de mercurio del tubo desciende y una parte de aquél cae en el depósito; si la temperatura se eleva, el mercurio vuelve á subir. Retirado el instrumento, se le sumerge en un baño que se enfria hasta que el mercurio del índice toque de nuevo el extremo de la punta.

Cuando hablemos de las temperaturas del mar, indicaremos las precauciones que exige el empleo de los termómetros de version.

VII

MEDIDA DE LAS ALTAS TEMPERATURAS.—PIROMETRIA

Los límites extremos de las temperaturas que el termómetro de mercurio puede marcar son, bajo cero, —40° y sobre cero + 360°, por cuanto la primera es la de la congelacion del mercurio, y la segunda la de su punto de ebullicion. En realidad los límites verdaderos son —36° y + 350°. A los 36°, el mercurio sufre ya contracciones irregulares y sus indicaciones son inciertas. Se procura no llegar á los 360°, porque la ebullicion podria romper el tubo. Con el termómetro de alcohol se pueden apreciar temperaturas inferiores á —36°. Falta pues dar con el medio de medir las temperaturas que excedan de la de la ebullicion del mercurio. Los instrumentos que sirven para este objeto han recibido el nombre comun de *pirómetros.* Más adelante describiremos aquellos de estos aparatos, muy diferentes de los termómetros ordinarios, que usan los físicos para sus investigaciones y que son los *pirómetros de aire ó de vapor de iodo.* En este artículo sólo trataremos de los pirómetros usados en la industria y que sirven para averiguar la temperatura de los hornos de porcelana, de los metálicos, etc.

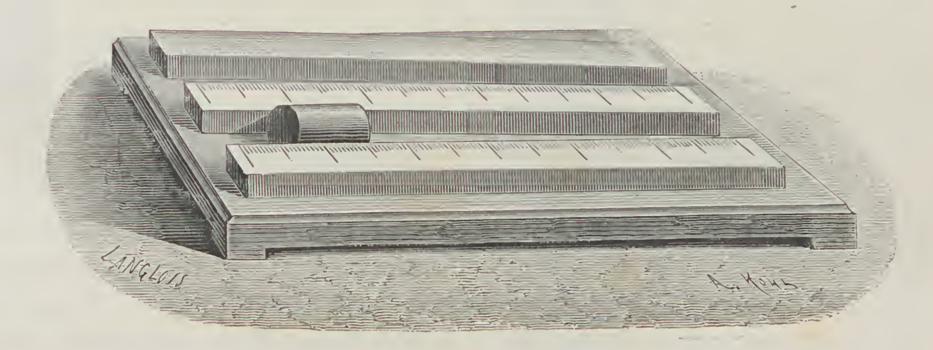


Fig. 27.—Pirómetro de Wedgwood

Uno de los más antiguos y difundidos es el *pirómetro de Wedgwood,* que lleva el nombre de su inventor, célebre alfarero inglés. Está basado en la propiedad que tiene la arcilla de contraerse tanto más cuanto más elevada es la temperatura á que se la somete.

Véase cuál es la disposicion de este pirómetro. Se fijan en una placa metálica dos reglas de acero formando entre sí un ángulo muy pequeño y dejando así en su intervalo una ranura de anchura decreciente. Una de las reglas está dividida en partes iguales, siendo

esta graduacion la que sirve de medida de la contraccion de la arcilla, puesto que indica hasta qué punto de la escala ó de la ranura puede penetrar un cilindro de arcilla, cuando ha adquirido la temperatura del horno en que ha estado metido. El cero de la division está en la base más ancha de la ranura, que comprende en toda su longitud 240 divisiones iguales. A fin de dar ménos longitud al aparato, se emplean por lo comun tres reglas, como se ve en la figura 27. El espacio angular comprendido entre las dos primeras no es otra cosa sino la prolongacion del que media entre la segunda y tercera reglas.

Para operar, se hace uso de pequeños cilindros de arcilla, amasados con pasta bien homogénea, y puestos en seguida á secar á la temperatura del rojo oscuro. Se los lima hasta dejarlos de un diámetro tal que colocados á lo largo entre las reglas penetren hasta el cero de la division. Para conocer la temperatura de un foco, por ejemplo de un horno de porcelana, se mete en él uno de dichos cilindros, y cuando se calcula que ha estado el tiempo suficiente para adquirir su temperatura, se le saca, se le deja enfriar, y se le introduce entre las reglas del pirómetro. Suponiendo que penetre hasta la 48.ª division, se dirá que la temperatura del horno está á 48° del pirómetro.

Falta saber en qué condiciones son comparables entre sí las indicaciones del pirómetro y á qué grados del termómetro de mercurio ó del de aire corresponden. Parece evidente que la primera cuestion depende tan sólo de la composicion de la arcilla empleada; pero es menester que esta composicion sea la misma para todos los cilindros. Wedgwood empleaba la siguiente: cada 100 partes de arcilla contenia 44'29 de alúmina, 47'35 de sílice y 8'36 de agua. La segunda cuestion es más delicada. Para resolverla, Wedgwood midió la dilatacion de un cilindro de plata, por medio de un molde de tierra de pipas que era la reproduccion de una parte del pirómetro, elevando su temperatura de 100° á 360°, y de este modo vió que el cilindro de plata retrocedia 23,4 divisiones del pirómetro para un aumento de temperatura de 260°: lo cual venia á ser 11°,11 por division. Hecho esto, y metiendo sucesivamente el cilindro de plata y uno de arcilla en un hogar, vió que el segundo avanzaba 2,25 divisiones, al paso que el primero retrocedia 66. Suponiendo una dilatacion constante en la plata, la temperatura del hogar era 66 × 11°,11 centígrados, + 10° que tenia el cilindro de plata en el momento de la inmersion, ó sea 743°. Otra operacion dió por resultado 1032° por 6,25 divisiones del pirómetro. De donde Wedgwood dedujo que la diferencia, ó sea 4 divisiones, equivalia á la de las temperaturas calculadas ó bien á 289°, lo cual representa una division del pirómetro por cada 72 grados centesimales.

Por desgracia, esta determinacion se basa en una hipótesis inexacta, la de la invariabilidad de la dilatacion de la plata, cualquiera que sea la temperatura, y por tanto las indicaciones del pirómetro que acabamos de describir no pueden compararse con las de los termómetros ordinarios, resultando que su uso, muy precioso en la práctica, en la que sólo se quieren conocer los efectos, carece de valor científico. En realidad no es más que un *piroscopio*.

Lo propio sucede con el aparato ideado por Brongniart y del que se valia este físico en la fábrica de porcelana de Sèvres para conocer la temperatura de los hornos. Consiste en una barra de hierro, plata ó platino metida en una ranura practicada en una pieza de porcelana AB, fija en el horno (fig. 28). Al dilatarse esta barra

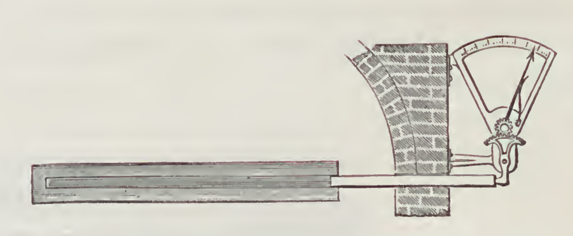


Fig. 28. —Pirómetro de Brongniart

por efecto del calor, empuja una varilla *ab* de porcelana, uno de cuyos extremos sale fuera del horno, dando contra el brazo menor de una palanca acodada. El movimiento se trasmite, amplificándose, al otro brazo en forma de manecilla que recorre los grados de un arco de círculo; y sabiéndose por experiencia á qué divisiones de esta escala arbitraria corresponden las temperaturas necesarias para las operaciones de coccion del horno, no se necesita más; bien es verdad que con estos aparatos no se pueden valuar las mismas temperaturas en grados centígrados.

El pirómetro de Main, usado hace algun

tiempo en Inglaterra, consiste en una vasija formada de tres cilindros de cobre concéntricos. El cilindro central contiene un termómetro de mercurio cuyo tubo y escala salen fuera de la vasija; el exterior A está lleno de una sustancia mala conductora del calor. Por último, el cilindro intermedio B, ó el espacio

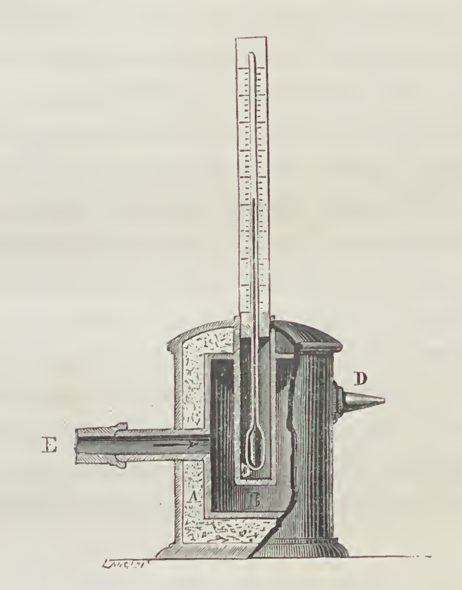


Fig. 29.—Pirómetro de Main

anular comprendido entre los dos primeros, comunica con el horno ú hogar cuya temperatura se quiere conocer, por medio de un tubo E que da paso al aire caliente, el cual sale al exterior por un orificio cónico D, despues de comunicar al cilindro interior, así como al termómetro contenido en él, una parte de su calor. Cuanto más elevada es la temperatura á que está el aire caliente del horno, mayor será el calor comunicado y más altas tambien las indicaciones termométricas. En cuanto á la graduacion del pirómetro (ó á la relacion que existe entre las temperaturas del horno y las correspondientes del termómetro de mercurio), se la obtiene con el auxilio de pirómetros metálicos; lo que equivale á decir que no es posible expresar con exactitud las temperaturas en grados centesimales.

Más adelante hablaremos de los pirómetros de aire y de aquellos cuya construccion y uso están basados en determinaciones calorimétricas, permitiendo por lo tanto que se valúen con mucha aproximacion altas temperaturas; tambien diremos algo acerca de los métodos ópticos ó espectroscópicos propuestos por varios físicos y puestos recientemente en práctica con objeto de resolver el mismo problema.

VIII

NOCIONES HISTÓRICAS SOBRE LOS PROGRESOS DE LA TERMOMETRÍA

Los detalles en que hemos entrado con motivo de la construccion y graduacion de los diferentes aparatos termométricos, pueden dar una idea de las exigencias de la ciencia actual sobre el punto importante de la averiguacion exacta de las temperaturas. Hoy todavía no está resuelto el problema por lo que respecta á las temperaturas elevadas. Pero si se comparan los procedimientos y los instrumentos de que se sirven los físicos contemporáneos con los que han estado en uso en los dos siglos anteriores al nuestro, se tendrá idea de los progresos realizados.

Se hace remontar la invencion del termómetro á los últimos años del siglo XVI ó primeros del XVII, habiendo concebido la primera idea de él, Galileo segun unos, Cornelio Drebbel segun otros. Tambien se citan entre los inventores los nombres de Van Helmont, Sanctorius, Bacon, Fludd, Sarpi y Borelli. Sea lo que quiera, sus termómetros ó más bien sus termoscopios estaban basados en los efectos de la dilatacion del aire bajo la influencia del calor. Hé aquí, segun la *Enciclopedia* de D'Alembert, la descripcion y la figura del instrumento inventado por Drebbel:

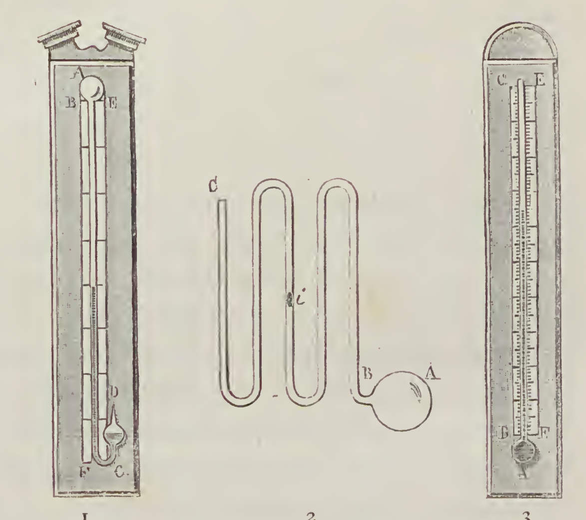


Fig. 30.—Termómetros usados en el siglo pasado; 1, termómetro de C. Drebbel; 2, de Galileo; 3, de Florencia

«En un tubo BC (fig. 30, 1), al cual va adaptado un globo de vidrio, AB, se echa una cantidad de agua comun mezclada con agua régia para impedir que se hiele en invierno; y á esta mezcla se agrega un poco de vitriolo para te-

ñirla de verde. Al llenar el tubo, hay que cuidar de dejar en él y en el globo bastante aire para que pueda llenar precisamente el globo en lo más riguroso del invierno, cuando el aire está más condensado, y para que no pueda expulsar del tubo todo el líquido durante los más fuertes calores del verano, cuando la atmósfera está en su mayor grado de enrarecimiento. En el otro extremo del tubo hay otra bola ó globo de vidrio CD, abierto por el lado del aire en D; á los dos lados del tubo se aplica una escala, ó platina EF, en la cual se marcan los grados ó cierto número de líneas á igual distancia entre sí. En tal estado, cuando el aire que rodea el tubo es más caliente, el contenido en la bola y en lo alto del tubo se dilata, empuja el líquido á la bola inferior y por consiguiente lo hace bajar; por el contrario cuando el aire que rodea el tubo se enfria, el contenido en la bola se condensa y hace subir el licor.»

El termoscopio así descrito es el que se atribuye á C. Drebbel. Véase cómo se construia el de Galileo (fig. 30, 2): «Pónese del mismo modo y con idénticas precauciones una corta cantidad de azogue, que no exceda del tamaño de un guisante, en un tubo BC, que se acoda en muchos sitios, para poderlo manejar más fácilmente y con ménos riesgo de romperlo, y se le divide en cierto número de partes iguales que sirven de escala. En tal estado, las varias aproximaciones del mercurio hácia la bola A marcarán los aumentos y los diferentes grados de calor.»

El redactor del artículo, que no es otro sino el mismo D'Alembert, añade: «Los defectos de ambos termómetros consisten en que están sujetos á recibir las impresiones de dos causas; porque no tan sólo el aumento de calor sino tambien el del peso de la atmósfera es el que puede hacer subir el líquido en el primero, y el mercurio en el segundo; y por otro lado, puede ser la disminucion del peso, así como la del calor de la atmósfera la que haga descender el líquido y el mercurio en los dos termómetros.»

La célebre sociedad científica de Florencia, conocida con el nombre de *Academia del Cimento*, fué la primera que construyó un termómetro basado en la dilatacion de los líquidos y que, con la denominacion de *termómetro comun ó de Florencia*, ha sido el tipo de los aparatos modernos. Consistia simplemente en un tubo soldado á una bola llena de espíritu de vino ó de alcohol teñido de rojo. «Llénase de este espíritu de vino, así teñido y preparado, una bola de vidrio AB (fig. 30, 3) y un tubo BC, y para que durante el invierno no baje todo el espíritu de vino á la bola, es conveniente poner esta bola en un montoncito de hielo mezclado con sal; ó si se construye el instrumento en invierno, se pone la bola en agua pura impregnada de salitre para que, al condensarse mucho el espíritu de vino, se pueda ver hasta qué punto bajará en lo más recio del frio. Si el alcohol sube á demasiada altura sobre la bola, es preciso extraer parte de él; y para que el tubo no sea muy largo, conviene poner la bola, llena de su espíritu de vino, en agua hirviendo, y marcar el punto más distante de ella al que asciende entónces el líquido. En este punto se cerrará el tubo herméticamente á la llama de una lámpara, y á uno y otro lado de él se aplicará una escala como en los demás termómetros.» *(Enciclopedia.)*

Despues de describir como queda dicho los termómetros hasta entónces usados, D'Alembert enumera algunos de sus defectos, insistiendo más especialmente, y se comprende, en la imposibilidad de comparar sus indicaciones. «Otro gran defecto, dice, consiste en que estos termómetros no son comparables entre sí. Verdad es que marcan los diferentes grados de calor y frio, pero cada cual de ellos los marca para sí mismo y á su modo. Además, no parten de un punto fijo de calor ó de frio, y este es otro defecto comun á todos los termómetros. Sucede con estos instrumentos lo que con dos relojes, que por no haberlos arreglado de antemano á la marcha del sol, señalarán la hora con retraso y nunca la exacta del dia ó del sol.»

Varios físicos comprendieron la necesidad de partir de puntos fijos para graduar los termómetros y hacerlos comparables, y á mediados del siglo XVII propuso Roberto Boyle que se tomara como primer punto la congelacion del agua, habiendo adoptado varios físicos como segundo punto la fusion de la manteca. Renaldini graduaba su aparato metiéndolo en hielo fundente, y luégo en mezclas de hielo y agua hirviendo en proporcion determinada. En 1701, Newton marcaba 0° á la fusion del hielo y 12° á la temperatura de la sangre humana. Al tratar

de la escala de Fahrenheit hemos visto cuáles eran los puntos fijos adoptados por este físico: la temperatura del agua hirviendo era el más elevado. Por último, en 1730 Réaumur adoptó para su termómetro, cuyo uso se ha generalizado tanto, el hielo fundente y el agua hirviendo; pero este físico tuvo el mérito de definir con más precision que hasta entónces se habia hecho, la unidad de temperatura, es decir, el grado. Dividia cuidadosamente los tubos de sus termómetros en partes de igual capacidad, y para llenarlos se valia de espíritu de vino, cuya dilatacion fué tal, que siendo su volúmen igual á 1,000 en el punto de congelacion del agua, llegó á 1,080 al calor del agua hirviendo. El grado era pues la 80.ª parte de la dilatacion total del líquido entre los dos puntos fijos. Tal fué el orígen de la escala llamada de Réaumur.

Vino en seguida el sueco Celsio, quien en 1742 propuso la division centesimal entre los mismos puntos fijos del hielo fundente y el agua hirviendo.

Otro progreso importante de la termometría, que data asimismo del siglo XVIII, fué la sustitucion del mercurio por el alcohol. Musschenbroek censuró el empleo de este líquido que, segun dice, pierde á la larga su virtud expansiva, y por otra parte su punto de ebullicion poco elevado. Además el mercurio tiene la ventaja de que siempre se le puede obtener puro. «Siempre subsiste el mismo áun cuando se le guarde muchos años, y por viejo que sea siempre se dilata con igualdad.» Los termómetros de Amontons, Fahrenheit y Delisle eran de mercurio.

La termometría, tan defectuosa é imperfecta en un principio, fué de este modo y poco á poco adquiriendo mayor precision, hasta que, gracias á los perfeccionamientos introducidos en sus procedimientos por ciertos físicos como Petit y Dulong, llegó á cobrar el grado de rigurosa exactitud que hoy posee, por lo ménos en los límites de temperatura comprendidos entre el punto de dilatacion y el de ebullicion del mercurio. Puede asegurarse que, á no ser por estos perfeccionamientos, la ciencia del calor no habria podido desarrollarse, y que las demás partes de la Física hubieran continuado tan imperfectas como ántes en un gran número de sus ramas. El termómetro es para la Física un instrumento tan importante como la balanza para la Química.

CAPÍTULO III

DILATACION DE LOS SOLIDOS

I

EFECTOS DE LA DILATACION.—DILATACION DE LOS SÓLIDOS, LINEAL, SUPERFICIAL Y CÚBICA

Todo cuerpo se dilata ó aumenta de volúmen por efecto del calor, recobrando luégo su volúmen primitivo ó contrayéndose así que pierde e calor que habia recibido. Tal es el fenómeno general que se manifiesta en diferentes grados, segun que e cuerpo sea gaseoso, líquido ó sólido; tal la propiedad que sirve de fundamento para la termometría y merced á la cual se ha podido, segun acabamos de ver, definir la temperatura y luégo construir aparatos á propósito para medirla. No se podia pensar en construir estos aparatos con el grado de perfeccion que hoy alcanzan, sin conocer ántes en virtud de qué leyes se efectúan las variaciones de volúmen en cuestion. Por consiguiente, era ante todo preciso medirlas relativamente á cada cuerpo, segun que este se presente en uno ú otro de los tres estados, resolver en una palabra el problema siguiente: «¿Cuánto aumenta el volúmen de un cuerpo, en qué fraccion del volúmen primitivo se acrecienta por cada grado centígrado de calor? ¿Esta fraccion varía de un cuerpo á otro, y para un mismo cuerpo subsiste igual á cualquier temperatura?» Tales son las cuestiones que naturalmente se han planteado los físicos, despues de haber reconocido por la observacion los efectos de las variaciones del calor. Antes de dar una idea de los resultados obtenidos, demostremos con algunos ejemplos

la utilidad del conocimiento exacto de estos efectos y la necesidad en que á menudo se está, áun fuera de los laboratorios científicos, de corregirlos ó preverlos. Ocupémonos ante todo de la dilatacion de los sólidos.

Si se somete un cuerpo frágil y mal conductor del calor á un cambio brusco de temperatura, el efecto inmediato será la rotura del cuerpo. Así por ejemplo, un pedazo de vidrio frio sobre el cual se ponga una barra de hierro candente, se raja, sucediendo lo propio con un pedazo de vidrio muy caliente en cuyo contacto se ponga de pronto una barra de hierro fria. En el primer caso, sobreviene una dilatacion brusca en las partes del vidrio tocadas por el hierro hecho ascua, y las partes inmediatas que no han tenido tiempo de calentarse todavía se separan violentamente de las primeras, ocasionando la rotura. En el segundo caso, las partes tocadas son, por el contrario, las que se contraen ántes que las inmediatas hayan tenido tiempo de enfriarse, y la rotura es tambien la consecuencia de este brusco movimiento molecular. Todo el mundo sabe que no se debe verter agua hirviendo en una vasija fria, so pena de que se rompa por efecto de la dilatacion inmediata de la porcion de las paredes que toca el líquido. Lo propio sucederia si se pusiera la vasija vacía sobre brasas; más adelante veremos cómo se evita este resultado, llenando la vasija del líquido que se quiere calentar ántes de ponerla al fuego.

La dilatacion que durante la estacion calurosa experimentan los metales que se emplean en la construccion de edificios y su contraccion á causa de los frios del invierno, producen efectos tanto más sensibles cuanto que estos metales están unidos con materiales cuya dilatabilidad difiere más de la suya. Hé aquí un ejemplo curioso, citado por Tyndall en su obra sobre el *Calor*, y cuya observacion y explicacion corresponden al canónigo Moselly:

«El tejado del coro de la catedral de Bristol es de planchas de plomo; su longitud de 20 metros y su altura de 7. Habia sido colocado en 1851, y á los dos años ó sea en 1853, bajó casi $1^{m},50$. El plomo habia empezado á bajar casi inmediatamente despues de su colocacion. Intentóse, aunque en vano, contenerlo en su marcha descendente por medio de clavos clavados en los caballetes, pero la fuerza que lo arrastraba era tal, que arrancó violentamente los clavos. La pendiente del tejado no era muy grande; por consiguiente no era el peso el que hacia bajar los plomos. Véase la causa productora de semejante efecto: «El plomo está expuesto noche y dia á las variaciones de temperatura. De dia, el calor lo dilata, y si descansara en una superficie horizontal, la dilatacion se efectuaria por igual en todos sentidos; en una superficie inclinada es mayor bajando que subiendo. Por el contrario, de noche el plomo se contrae por el frio, pero la contraccion de arriba abajo del borde superior es mayor que la de abajo arriba del inferior. Sus movimientos eran exactamente los de un gusano; de dia avanzaba su borde inferior y de noche encogia el superior; las variaciones de temperatura del dia y de la noche obraban en el mismo sentido. Así fué que arrastrándose lentamente habia avanzado en dos años $1^{m},50$.»

Por este ejemplo se ve cuán importante es tener en cuenta los cambios de volúmen de los sólidos empleados en la construccion de edificios ó en la industria. Los carriles de las vías férreas se alargan en verano y se encogen en invierno; por lo cual, al colocarlos, es preciso dejar entre ellos una pequeña separacion para que puedan alargarse libremente; de lo contrario, el calor haria saltar los clavos de los cojinetes y deformaria la vía. El descarrilamiento que ocasionó en 1744 la catástrofe de Fampoux, en la línea del Norte de Francia, tuvo por causa, segun parece, una deformacion de esta clase, dimanada del escaso espacio que mediaba entre las puntas de los rails.

Las piedras unidas con grapas ó abrazaderas de hierro se rompen con frecuencia, ya por la dilatacion ó ya por la contraccion del metal, una y otra más considerables que las de la piedra. La fuerza con que las moléculas de los cuerpos se apartan ó se acercan unas á otras por efecto de su cambio de temperatura es enorme. Una barra de hierro de un metro de largo se dilata $1^{mm},17$ en el sentido de su longitud cuando se eleva su temperatura de 0° á 100°; se contraeria otro tanto si se la pasara de 100° á 0°. Pues bien, se calcula que para contrarestar este movimiento molecular, seria preciso ejercer en un sentido ó en otro un esfuerzo

equivalente á la presion de 2,450 kilógramos, si la barra de hierro tiene un centímetro cuadrado de seccion, y de 245,000 kilógramos si la seccion es de un decímetro cuadrado. Se ha utilizado esta fuerza para acercar las paredes laterales de una galería del Conservatorio de Artes y oficios, que se habian separado de la vertical á causa del empuje de la bóveda. A este fin se pusieron varias barras de hierro de modo que atravesaran las dos paredes por su parte superior, terminando por la de fuera en roscas provistas de tuercas. Se las calentó fuertemente en toda su longitud, lo cual produjo cierta prolongacion, y se atornillaron las tuercas contra gruesos trozos de madera aplicados á la cara exterior de las paredes de la bóveda miéntras las barras estaban todavía calientes. El enfriamiento contrajo las barras, y la fuerza de contraccion acercó poco á poco las paredes. Repitiendo muchas veces la misma operacion, se consiguió devolverlas su posicion vertical. Los aperadores de carros utilizan la fuerza de contraccion del hierro que se enfria para poner las llantas en las ruedas. El aro de hierro está forjado de modo que abarca el contorno de la madera cuando se le calienta á una temperatura bastante elevada; al enfriarse, se contrae comprimiendo fuertemente el contorno de la rueda.

Dase el nombre de *lágrimas bátavas* ó *gotas de Rupert*, á las gotas de vidrio derretido que



Fig. 31.—Lágrima bátava

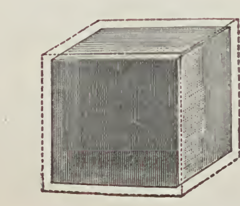


Fig. 32.—Dilatacion lineal y dilatacion cúbica

se han solidificado súbitamente en el agua fria. Rompiendo el filamento de vidrio en que terminan, toda la masa se reduce instantáneamente á polvo con tal fuerza, que si se ha sumergido préviamente la lágrima bátava en una redoma llena de agua, el choque trasmitido por el líquido basta para romper la redoma. Obtiénese el mismo efecto con frascos de vidrio muy recio, enfriados repentinamente despues de haberlos soplado. Un grano de arena echado en la vasija basta para hacer volar el fondo en pedazos (Tyndall). La razon de tal fenómeno es la misma en este caso que en el de las lágrimas bátavas. Lo primero que se enfria es el exterior de las gotas de vidrio, aprisionando la masa interior aún no solidificada. Al enfriarse esta á su vez, se contrae, y ejerciéndose el esfuerzo de contraccion por igual en toda la envolvente externa, esta permanece en equilibrio. Pero todas las moléculas se hallan en un estado de tension violenta, y la menor rotura destruye súbitamente el equilibrio en un punto, destruyéndolo al propio tiempo en toda la masa.

Podríamos multiplicar los ejemplos de los curiosos efectos de la dilatacion; los que acabamos de indicar bastan, prescindiendo de toda preocupacion científica, para hacer ver cuánto importa saberlos medir ó calcularlos para corregirlos ó prevenirlos. Para esto se necesita conocer lo que se llama *coeficiente de dilatacion*. Entiéndese por esto el aumento que experimenta la unidad de volúmen de un cuerpo cuando se eleva su temperatura 1° centígrado. Tomemos un ejemplo: Un litro ó un decímetro cúbico de mercurio calentado de 0° á 1° se convierte en un litro más 179 millonésimas de litro, ó 1$^{\text{dc}}$,000179. La fraccion 0,000179 es el coeficiente de dilatacion del mercurio, para la temperatura cero. Los números de que aquí se trata varían con la naturaleza y el estado físico de las sustancias. Además, el coeficiente de dilatacion de un mismo cuerpo varía por regla general á los diferentes grados de la escala termométrica, áun cuando su estado físico no cambie.

Con respecto á los líquidos y gases, sólo se considera la dilatacion en volúmen ó cúbica; pero tratándose de los sólidos, se puede tener únicamente en cuenta el aumento de una de sus dimensiones, es decir, la *dilatacion lineal*, ó el de dos, ó *dilatacion superficial*. Como un cuerpo sólido de cualquier forma se dilata comunmente por igual en todos sentidos, de modo que queda semejante á sí mismo á todas las temperaturas, puede deducirse el aumento de su volúmen de una sola de sus dimensiones, demostrándose por otra parte que el coeficiente de dilatacion cúbica es sensiblemente el triple del de la lineal. Por esta razon, cuando se trata de cuerpos sólidos, es este último coeficiente el que más á menudo se procura determinar.

II

MEDIDA DE LA DILATACION DE LOS CUERPOS SÓLIDOS

Antes de 1781, en cuya época Laplace y Lavoisier emprendieron, valiéndose de un método que vamos á describir, la determinacion del coeficiente de dilatacion lineal de varios cuerpos sólidos, habíanse hecho ya muchas tentativas con el mismo objeto; pero ninguna habia dado resultados suficientemente exactos (1). Véase en qué términos explican dichos sabios las precauciones que habian tomado para evitar las causas de error de los procedimientos anteriores, así como las disposiciones de sus experimentos:

«Hemos empezado por hacer construir muchos termómetros de mercurio muy exactos en los cuales estaban marcados el término del hielo fundente y el del agua hirviendo. El intervalo de cada grado era de unas dos líneas (4^{mm},5) y podia subdividirse fácilmente á la vista en diez partes. Sin embargo, como, á pesar de la atencion del artista que habia construido dichos termómetros, podian temerse algunas irregularidades en su marcha, los hemos comprobado todos, comparándolos con un patron de confianza, y hemos formado para cada uno una tabla de correccion.

»En vez de emplear una estufa, por ser difícil mantener todas sus partes á un mismo grado de temperatura, hemos preferido valernos de un baño, que hemos llenado al principio de hielo machacado, y luégo de agua, cuya temperatura podíamos elevar sucesivamente desde la congelacion hasta la ebullicion.

»Este baño podia contener reglas de seis piés de longitud.

»Hemos operado en un jardin (el del Arsenal) y al aire libre; los puntos de apoyo de nuestro pirómetro consistian en gruesos cubos de piedra de sillería, cimentados á seis piés de profundidad en un terreno sólido.

»Por último, no usábamos ruedas ni engranajes para multiplicar el movimiento, sino palancas muy sólidas y absolutamente inflexibles al grado de resistencia que experimentaban. Estas palancas ponian en movimiento un anteojo acromático de seis piés de longitud, movible sobre un eje, y dirigido sobre una escala dividida en pulgadas y líneas, situada ora á 100 ó bien á 200 toesas de distancia, segun la clase de los experimentos.

»Una prolongacion de una línea en la regla de seis piés sujeta al experimento hacia recorrer el anteojo, cuando la mira estaba colocada á 100 toesas de distancia, 62 pulgadas ó 744 líneas, lo cual facilitaba el dividir la línea en 744 partes. Se hubiera podido conseguir doble precision trasladando la mira á 200 toesas, conforme lo habíamos hecho en los primeros experimentos; pero pronto echamos de ver que los vapores á menudo difundidos por la atmósfera oscurecian la vision, y que por esta causa de incertidumbre se perdia más de lo que se ganaba aumentando el tamaño de la escala.

» Tales son, en términos generales, los prin-

---

(1) Segun parece, Musschenbroek fué el primer físico que hizo experimentos de esta clase (1731). El aparato que discurrió con tal objeto, y al que dió el nombre de *pirómetro*, es análogo al descrito anteriormente (fig. 3). Sólo que en lugar de una simple palanca acodada para recibir la accion de la barra dilatada, hacia uso de un mecanismo bastante complicado de piñones y ruedas dentadas, que trasmitia el movimiento á una aguja móvil sobre un cuadrante con divisiones. Una serie de mechas de lámparas de alcohol calentaban la barra metálica. Aparte del defecto procedente de la complicacion de los engranajes, el aparato de Musschenbroek adolecia de falta de fijeza en la barra, dispuesta en una jaula de hierro que se dilataba por sí misma; las dimensiones de sus barras (5 $^1/_2$ pulgadas) eran sobrado escasas, y por último, la valuacion de la temperatura casi imposible. Todo cuanto pudo hacer fué comprobar y comparar las dilataciones desiguales de diferentes metales.

Bouger publicó en 1745 los experimentos que hizo en Quito con el mismo objeto; pero su aparato, toscamente construido, era muy defectuoso, y su termómetro, graduado por la escala Réaumur á una altitud de 1,460 toesas sobre el nivel del mar, marcaba temperaturas demasiado elevadas. Los resultados que obtuvo eran muy inexactos.

Smeaton hizo en Inglaterra, en 1754, experimentos sobre la dilatacion de los metales. Operaba con barras de 2 piés 4 pulgadas que metia alternativamente entre hielo machacado y agua hirviendo, de suerte que, como observa Lavoisier, «sus resultados son independientes de todo error en la construccion del termómetro.» Pero los puntos de apoyo de sus barras carecian de fijeza; descansaban en varillas de madera que se dilataban tambien por efecto del calor, y lo que él media, no era la dilatacion de la barra, sino el exceso de esta dilatacion sobre la de la varilla que servia de soporte.

Finalmente, de 1756 á 1760, Berthoud empleó un pirómetro más sencillo que el de Musschenbroek, pero tambien bastante complicado. Además colocaba verticalmente las barras con las cuales operaba en un baño de 4 á 5 piés de altura. Pero la temperatura del aire de semejante recinto era necesariamente variable segun la altura á que estaba sumergida la bola del termómetro. Lo incierto de la graduacion de este último instrumento, la escasa diferencia de las temperaturas que se unian á la desigualdad probable de la temperatura de los varios puntos de la barra metálica, no permitian contar con resultados exactos.

Los métodos que vamos á describir han sido experimentados, el primero por Laplace y Lavoisier durante los años 1781 y 1782; el segundo, debido al general Roy y á Ramsden, en 1785. En uno y otro experimento se han allanado felizmente las principales dificultades de los anteriores procedimientos. Pero nos ha parecido instructivo ántes de describirlas, demostrar las tentativas que han tenido que hacerse; es un ejemplo que se reproduce con frecuencia y puede decirse que casi necesariamente en las ciencias experimentales.

cipios en que está basada la construccion del pirómetro de que hemos hecho uso.»

La fig. 33 dará más precision á la descripcion precedente y mostrará en qué consiste esen-

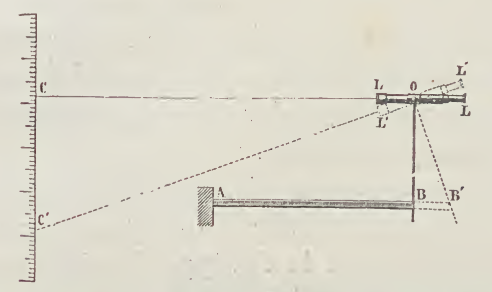


Fig. 33.—Medida de la dilatacion linear de un sólido. Principio del método de Lavoisier y Laplace

cialmente el método ideado por Lavoisier y Laplace para medir la dilatacion linear de una barra sólida. La barra A B está fija en A, de suerte que no puede dilatarse sino por su extremo B. Al dilatarse la cantidad BB', empuja una varilla O B, que puede girar alrededor del punto O, en la posicion OB'. Un anteojo LL, al principio horizontal, gira á su vez en L'L', de suerte que en lugar de estar dirigido al punto C de la mira vertical CC', se dirige entónces al punto C'. Así pues, por este medio se sustituye la medida difícil de la exigua cantidad BB', con una longitud CC', que vale tantas veces la primera como veces la distancia OC de la mira contiene la altura de la varilla OB.

La fig. 34 representa la disposicion del aparato que ha servido para realizar el método anterior. Vése la barra S, cuya dilatacion se quiere medir, metida en una cubeta C llena de agua, debajo de la cual está el hornillo que ha de elevar su temperatura (en una segunda serie de experimentos, el agua no estaba calentada por el hornillo, sino introducida ya hirviendo en la cuba). Por una parte, se apoya en una barra de vidrio fija B', unida invariablemente á los pilares; por otra, tropieza con la regla de vidrio móvil B que comunica su movimiento al anteojo. Estando el agua de la cuba al principio á 0°, los observadores anotan la division de la mira á que corresponde el hilo micrométrico horizontal puesto en el foco del anteojo. Luégo, despues de reemplazar el agua helada por otra que se eleva á 100°, temperatura de la ebullicion, observan de nuevo la division de la mira. En virtud de una proporcion simple, deducen la relacion de la prolongacion de la barra con su longitud primitiva, es decir, la dilatacion correspondiente á 100° de temperatura.

Despues de un gran número de experimentos (cada uno de ellos se repetia por lo ménos cinco ó seis veces), Lavoisier y Laplace hicieron las deducciones siguientes:

«1.° Todo cuerpo calentado desde el punto de congelacion hasta el de ebullicion del agua, y enfriado desde éste á aquél, recobra rigurosamente sus primeras dimensiones; 2.° el vidrio y los metales experimentan dilataciones sensiblemente proporcionales á las del mercurio, de suerte que doble número de grados del termómetro da doble dilatacion; triple número de grados, triple dilatacion, etc.»

El acero templado les presentó diferencias extraordinarias, por ir disminuyendo su dilatacion de un modo sensible con el aumento de temperatura; lo cual consiste en que el acero templado tiene una dilatacion mucho mayor que la del acero sin templar. Por el calor, el primero experimenta un principio de recoccion y pierde

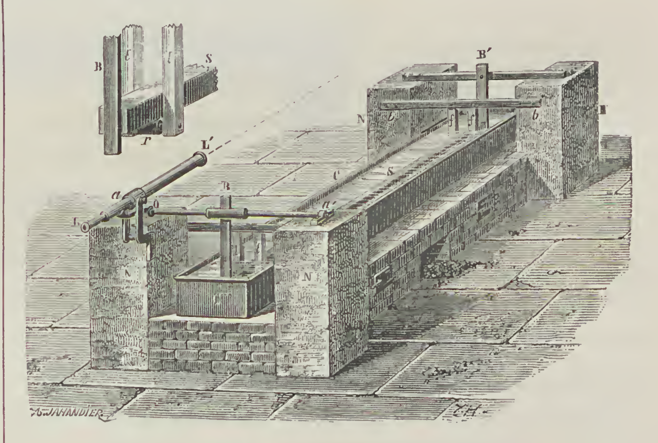


Fig. 34.—Aparato de Laplace y Lavoisier para la medida de la dilatacion linear de los sólidos

así una parte de su dilatabilidad. Tambien reconocieron que el vidrio se dilata desigualmente segun los ejemplares puestos á prueba, es decir, segun la calidad, el grado de coccion y la proporcion de los ingredientes que entran en su composicion. La dilatabilidad del hierro varía mucho asimismo segun los distintos estados en que se encuentra; por lo tanto, los hierros del comercio no son metales idénticos. Así tambien, el estaño de las Indias es más dilatable que el de Cornualles.

Lavoiser y Laplace consignan al fin de la Memoria que sobre este asunto escribieron la concordancia de los resultados numéricos dedu-

cidos por ellos con los de Smeaton, y sobre todo con los de Roy y Ramsden. Por lo demás hacen completa justicia al método adoptado por estos últimos, del cual vamos á decir cuatro palabras. Al llegar á la descripcion del aparato de Ramsden, añaden: «Este instrumento parece, por todos conceptos, muy á propósito para el objeto que se proponian estos inventores; ha debido dar resultados muy exactos, y es probable que si lo hubiésemos conocido ántes de dedicarnos á esta clase de experimentos, no hubiéramos tratado de discurrir otro.»

El general Roy hizo sus experimentos en 1785, con motivo de la medicion de la base de Hown-Stow-Heath, en la provincia de Middlesex, en Inglaterra. Tratábase de conocer con exactitud, para el buen éxito de dicha operacion geodésica, la dilatabilidad de las reglas metálicas empleadas en la medicion de la base, á los diferentes grados de temperatura á que se podia operar. Por lo demás, igual género de consideraciones habian inducido cuatro años ántes á Lavoisier y Laplace á emprender los experimentos que acabamos de describir.

Un constructor inglés, Ramsden, concibió el aparato que necesitaba Roy, aparato cuya disposicion se ve en la fig. 35. Consiste en tres artesas A, B, C, colocadas paralelamente sobre el mismo soporte. La del medio está destinada á recibir la varilla metálica *ad*, de 5 piés ingleses de longitud, cuya dilatacion se trataba de medir; esta varilla estaba metida sucesivamente entre hielo machacado, y luégo en agua que se calentaba hasta la ebullicion por medio de doce lámparas de alcohol. Cada una de las otras dos artesas, enteramente rodeadas de hielo á 0^o, contenia un prisma de palastro de la misma longitud que la regla. Los dos prismas extremos, que conservaban invariablemente la misma temperatura miéntras duraba el experimento, constituian un sistema de longitud invariable. Cada prisma llevaba en sus extremos y sobre columnitas verticales, el uno dos retículos de alambres cruzados que servian de mira y estaban alumbrados por espejitos, y el otro dos oculares en cuyos focos habia otros dos retículos de hilos cruzados; la regla del medio llevaba tambien dos objetivos, que formaban con los oculares precedentes dos anteojos astronómicos.

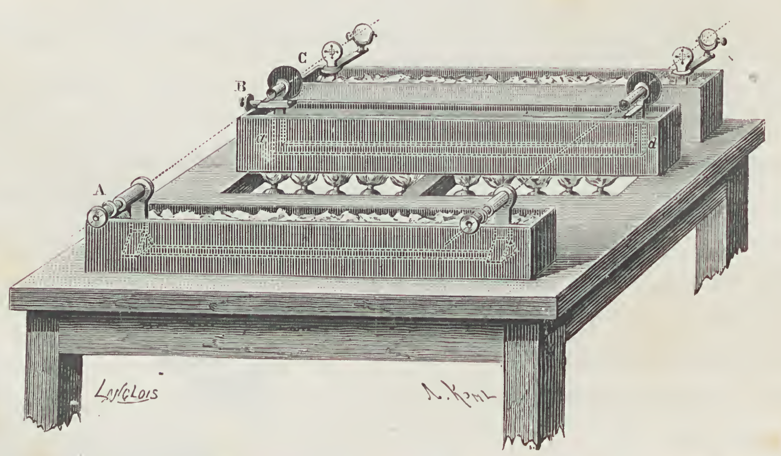


Fig. 35.—Aparato de Ramsden para medir la dilatacion de los cuerpos sólidos

Hé aquí cómo se opera con el aparato Ramsden:

Al principio del experimento, y estando los dos prismas y la regla á la misma temperatura del hielo fundente, se arreglan los tres sistemas de modo que mirando por cada ocular haya coincidencia perfecta de la imágen de los hilos reticulares que sirven de mira y de los hilos situados en los focos de los oculares. Entónces se eleva la temperatura del agua contenida en la artesa central hasta que llegue á la de ebullicion. La regla sumergida en ella se dilata; uno de sus extremos, que tropieza con un tornillo exterior, no se desvia, ó si se mueve, se la vuelve á su posicion primitiva. Así pues, toda la dilatacion tiene efecto en el otro extremo; pero la lente sostenida por el extremo opuesto puede moverse mediante un tornillo micrométrico que permite apreciar los centésimos de milímetro por ejemplo (en el aparato de Ramsden la precision de las medidas podia llegar á $^1/_{600}$ de línea de pié inglés ó $^1/_{25}$ de milímetro). El número de vueltas y fracciones de vuelta que se ha de hacer efec-

tuar al tornillo para que coincidan los hilos de los retículos, mide pues la cantidad en que se ha dilatado la regla entre 0° y 100°, ó entre 0° y cualquier otra temperatura á la cual se quiera hacer el experimento.

En la figura 36 damos la vista de conjunto de un aparato ideado por Pouillet para resolver las mismas cuestiones. La artesa que contiene la regla metida en el baño lleva en sus dos extremos dos aberturas circulares tapadas con cristales, que permiten observar, por medio de dos anteojos, uno fijo y otro móvil, dos puntos de mira trazados en los dos extremos de la regla. Esta se halla colocada sobre dos soportes de hierro que descansan en los bordes de la artesa, y merced á dos sistemas de tornillos se la puede colocar de tal suerte, que una de las miras esté siempre enfrente de la abertura que corresponde con el anteojo fijo.

Puesto el baño á la temperatura que se desea,

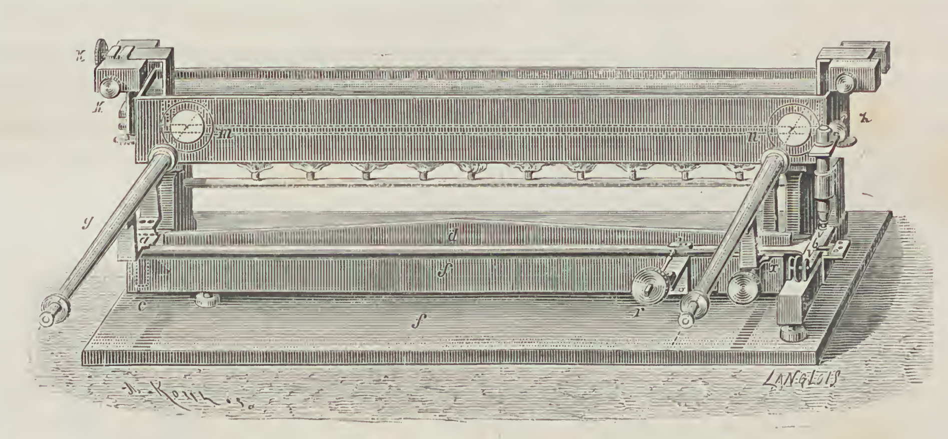


Fig. 36.—Aparato de Pouillet para medir dilataciones

la regla se dilata, la segunda mira se desvia, y con el anteojo móvil se puede seguir su movimiento al través del cristal trasparente. La medida de la dilatacion se obtiene del modo siguiente. El anteojo móvil va sostenido en una alidada *adb* de laton y puede girar con ella alrededor de un eje vertical *ac*. Esta alidada lleva divisiones que se leen con un anteojo micrométrico, merced al cual se puede estimar hasta $^1/_{600}$ de milímetro. En virtud de un experimento prévio, se sabe á qué fraccion de milímetro corresponde el movimiento de una division de la alidada producida por el cambio de posicion del anteojo móvil. Con el auxilio de este aparato, Pouillet ha podido medir dilataciones consiguientes á temperaturas inferiores á 300°; pero disponiendo de otro modo las reglas, en un hornillo por el que se podia hacer pasar aire caliente, ó bien una llama, le era posible medir dilataciones provinientes de temperaturas más altas.

Lleguemos ya á los resultados obtenidos, y terminemos este artículo con una tabla que dé los coeficientes de dilatacion linear de cierto número de cuerpos sólidos relativamente al intervalo de 0° á 100°. Cada número de dicha tabla expresa diezmillonésimas de unidad, de suerte que deberia ir precedido de las cifras 0,0000. Por ejemplo, el coeficiente de dilatacion del bismuto debe escribirse así: 0,0000139.

La dilatacion total de una barra sólida, de longitud L á 0°, relativamente á un número de grados t, se obtiene multiplicando esta longitud por el coeficiente del cuerpo y por t; añadiendo el producto á L, se tendrá la longitud de la barra dilatada; así lo expresa la fórmula siguiente, en la cual a es el coeficiente medio dado por el cuadro siguiente con respecto á la sustancia de que la barra está formada: $L' = L(1 + at)$.

COEFICIENTES DE DILATACION DE LOS SÓLIDOS POR 1 GRADO EN EL INTERVALO DE 0° Á 100°

1.° *Metales y aleaciones*

Zinc.	de 294 á	341
Cadmio.	»	313
Plomo.	278	288
Estaño..	194	228
Aluminio.	»	222
Cobre amarillo.	178	214
Plata.	191	208
Bronce..	182	191
Cobre rojo.	170	172
Oro..	147	155
Hierro..	116	144
Bismuto.	»	139
Acero recocido.	124	137
Acero templado	122	137

Acero.	107	119
Platino..	086	088

2.º *Varios sólidos*

Hielo (de — 27°,5 á — 1°)..	de 513	á 528
Yeso (longitud del prisma). .	»	140
Mármol blanco.	085	107
Vidrio blanco..	077	092
Piedra de sillería.	043	090
Flint.	082	087
Granito.	079	090
Mármol.	042	057
Ladrillos.	049	055
Madera de abeto.	035	050

Creemos inútil decir que las cifras extremas dadas aquí para cada coeficiente no tan sólo dependen de los experimentadores que las han deducido, segun el grado de perfeccion de los métodos empleados, sino de la naturaleza física de los ejemplares, de su mayor ó menor grado de pureza y de la diferencia de composicion de las aleaciones ó sustancias tales como el vidrio.

Es de notar que los metales más dilatables son tambien los más fusibles, y así lo habia comprobado Berthollet, quien creia poder deducir de ello que el coeficiente de dilatacion de un metal debe de ir aumentando á medida que se acerca á la temperatura de la fusion. Las medidas tomadas directamente han confirmado este modo de ver. Si se busca, por ejemplo, el coeficiente medio de dilatacion de un sólido, no ya de 0° á 100° como lo marca la tabla anterior, sino de 0° á 200°, á 300°, se obtienen cantidades mucho mayores. Hé aquí algunas:

Entre 0° y 100°, el coeficiente de dilatacion del platino varía de 0,0000086 á 0,0000088; entre 0° y 300°, sube á 0,0000092. Dulong y Petit han deducido 0,0000086 para una regla de vidrio blanco entre 0° y 100°; á 200°, el coeficiente del mismo vidrio llega á 0,0000092; á 300°, á 0,0000101. El cobre rojo tiene por coeficiente medio de 0° á 300 el número 0,0000188; el hierro, 0,0000147.

III

DILATACION DE LOS CRISTALES

En todo cuanto precede hemos supuesto que la dilatacion se efectuaba con igualdad en todos sentidos, y por consiguiente que todo cuerpo conservaba al calentarse ó al enfriarse, á cualquier temperatura, la forma que á otra temperatura tenia. Esto es exacto por lo que respecta á los sólidos homogéneos y amorfos, pero no lo es relativamente á los sólidos cristalizados, por lo ménos á aquellos cuyas propiedades físicas varian segun la orientacion.

En 1823, Mitscherlich hizo la observacion siguiente. Habiendo medido las inclinaciones mutuas de las caras de un romboide de carbonato de cal (espato de Islandia) á diferentes temperaturas, reconoció que estas inclinaciones variaban de una manera sensible: de 0° á 100° llegaba esta variacion á 8′ 30″. Los ángulos diedros disminuian cuando la temperatura aumentaba. Resultaba de aquí que la dilatacion era mayor en direccion del eje menor del romboide que en la de las otras diagonales; en una palabra, que la forma del cristal se aproximaba á la del cubo. Una consecuencia de este hecho

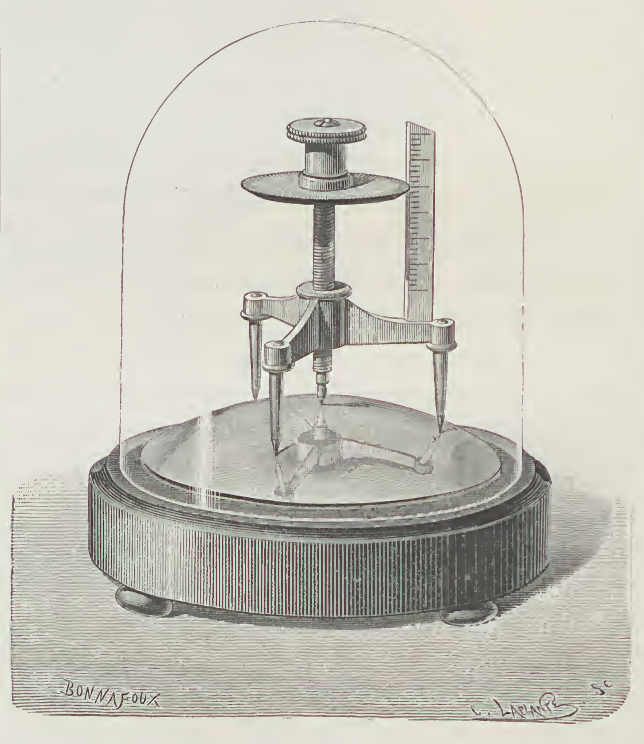


Fig. 37.—Esferómetro: valuacion de las curvaturas

es que la doble refraccion del espato de Islandia debia disminuir igualmente con la temperatura; y los experimentos de Fresnel confirmaron esta prevision de Mitscherlich. El coeficiente de dilatacion de la cal carbonatada en el sentido del eje menor es además bastante grande para que, áun en la hipótesis de que fuese nula perpendicularmente al eje, la dilatacion total de esta sustancia debiera exceder de la del vidrio. Pero la medicion directa de la dilatacion cúbica del espato de Islandia demuestra, por el contrario, que es inferior. De aquí se deduce una conse-

cuencia singular: la de que, si el calor dilata el cristal paralelamente á su eje, debe contraerlo ó acercar sus moléculas en direcciones perpendiculares. Para cerciorarse de este hecho, Mitscherlich hizo tallar placas de espato de Islandia, paralelamente al eje; luégo midió su espesor con un *esferómetro* á temperaturas diferentes, y comprobó la exactitud de sus previsiones.

Tenemos, pues, una sustancia cristalizada que experimenta en un sentido una dilatacion, y en otro una contraccion, por efecto de un aumento de calor. El espato de Islandia tiene así dos coeficientes, uno de dilatacion que tiene por valor 0,00002621, y otro de contraccion ó de dilatacion *negativa* cuyo valor es — 0,00000540.

Despues de las primeras investigaciones hechas por Mitscherlich y Fresnel, se prosiguió el estudio de las dilataciones de los cristales, del cual han resultado varias leyes que vamos á resumir.

Sábese que los cuerpos cristalizados, naturales ó artificiales, se dividen, segun su forma geométrica, en varios sistemas, cuyos caractéres no debemos definir aquí. Bajo el punto de vista de la dilatacion forman tres clases. A la primera pertenecen los cristales cúbicos ó aquellos cuya forma poliédrica se deriva del cubo; se dilatan con igualdad en todos sentidos, de suerte que su forma es siempre la misma á cualquier temperatura. La sal gema, el alumbre y el espato fluor son ejemplos de este primer sistema. La segunda clase contiene cristales caracterizados por un eje principal y dos ó tres secundarios situados en un plano perpendicular al primero. Estos cristales tienen dos coeficientes de dilatacion linear de valor desigual, el uno de los cuales corresponde á la direccion del eje principal y el otro á la direccion normal. El circon, el cuarzo, la cal carbonatada ó espato de Islandia, la turmalina y la esmeralda corresponden á este segundo sistema. Por último, la tercera clase comprende los cristales que tienen tres ejes desiguales, diferentes por sus propiedades, como el topacio, el sulfato de magnesia, el feldespato, y el yeso ó sulfato de cal. Estos cristales tienen tres coeficientes desiguales de dilatacion, ya segun su eje, ó ya segun otras direcciones.

Mediante un sencillo experimento, se puede comprobar esta desigualdad de dilatacion de los cristales, con un fragmento de yeso de la variedad conocida con el nombre de *yeso hierro de lanza*, que se encuentra especialmente en las canteras de los alrededores de Paris. En uno de estos fragmentos se talla una lámina terminada en dos caras planas y tersas perpendicularmente á la línea media que divide el cristal, y en seguida se la calienta á la temperatura de 80° por ejemplo. Entónces se nota fácilmente la deformacion que la desigualdad de dilatacion ha producido en ambas caras, las cuales han dejado de ser planas. Procurando ver por reflexion un objeto suelto y fino, por ejemplo un hilo, en una de ellas como en un espejo, se ven dos imágenes del hilo, lo que no sucederia si la cara hubiese continuado siendo plana como lo era ántes de elevar la temperatura.

M. Fizeau ha determinado los coeficientes de dilatacion de gran número de cristales valiéndose de un método óptico especial, que consiste en obtener los anillos coloreados de Newton por la superposicion de un plano de vidrio y de una lámina tenue del cristal, y luégo en observar la dislocacion de las franjas que resulta cuando se eleva la temperatura. Estudiando por este concepto las sustancias compuestas cristalinas que pertenecen al grupo de los cloruros, bromuros y ioduros metálicos, M. Fizeau no tan sólo ha reconocido su gran dilatabilidad que excede á la de los metales más dilatables, sino que tambien ha podido hacer patente una anomalía singular presentada por una de dichas sustancias, el ioduro de plata. Este compuesto que, segun hemos visto, ha desempeñado tan gran papel en la invencion de la fotografía, está formado de 54,02 partes de iodo y 45,98 de plata. Véase en qué términos anunciaba el sabio físico el caso á que nos referimos:

«El ioduro de plata, no tan sólo no posee la gran dilatabilidad de sus congéneres, sino que por este concepto presenta con ellos un contraste tan completo como inesperado. En efecto, de las varias pruebas á que se le ha sometido parece resultar con toda certeza que el ioduro de plata posee la propiedad de contraerse ó de disminuir de volúmen cuando sube la temperatura, y de dilatarse, por el contrario, ó de aumentar de volúmen cuando ésta baja, siendo siempre el fenómeno perfectamente regular y continuo entre los límites de temperatura de — 10° y + 70°. Conviene observar que el ioduro de plata no

es fusible sino á una temperatura elevada (á los 400°), de suerte que no se pueden atribuir los efectos en cuestion á las irregularidades que pudieran producirse en los límites de la temperatura correspondiente al cambio de estado de la sustancia. Por lo demás, los efectos son bien constantes y exactamente inversos uno de otro durante el calor y el enfriamiento.

»Así pues, la dilatacion del ioduro de plata se debe expresar con un coeficiente negativo, á lo ménos para todo el intervalo comprendido entre — 10° y + 70°. Además, á medida que la temperatura se eleva entre estos límites, el valor numérico del coeficiente aumenta notablemente, de suerte que la contraccion se ha efectuado en todas direcciones, y el coeficiente negativo ha resultado igual á — 0,000000139 y — 0,000000137. El ioduro de plata cristalizado se contrae en la direccion del eje principal y se dilata normalmente á esta direccion; pero el primer coeficiente es—0,00000397 y el segundo + 0,00000065, de suerte que en definitiva hay disminucion de volúmen.

Por el hecho de aumentar el calor el volúmen de los cuerpos, disminuye su densidad; por consiguiente, al determinar esta última á temperaturas diferentes por los procedimientos que hemos descrito, se podria deducir de los resultados obtenidos el valor del coeficiente de dilatacion cúbica. Y en efecto, de este modo ha sido fácil cerciorarse de un hecho sobre el cual se abrigaban dudas en otro tiempo; nos referimos á la contraccion del hielo por el frio; hasta se habia creido reconocer que el hielo se dilata á medida que baja su temperatura. Pero las medidas de la densidad de esta sustancia obtenidas por Brunner al evaluar la pérdida de peso en el aceite de petróleo de un mismo trozo de hielo exento de burbujas de aire á 0° y á — 6°, han dado por coeficiente de dilatacion linear un número mayor que para los otros sólidos conocidos, segun se ha podido ver ya en lo que concierne á los cuerpos continuados en el cuadro de la pág. 43. Posteriormente, Geissler y Plucker han deducido 0,0000528, cifra que pasa en dos tercios del coeficiente del zinc, el más dilatable de los metales.

CAPITULO IV

DILATACION DE LOS LIQUIDOS

I

DETERMINACION DE LA DILATACION ABSOLUTA DEL MERCURIO

Comparando entre sí los resultados consignados en los diferentes artículos del capítulo anterior, se ve fácilmente que los cuerpos sólidos, amorfos ó cristalizados, distan mucho de seguir la misma ley en sus cristalizaciones. Sus variaciones de volúmen para un mismo cambio de temperatura no tan sólo difieren considerablemente de un cuerpo á otro, sino tambien, en un mismo cuerpo, cuando se consideran variaciones iguales de la temperatura en diferentes puntos de la escala termométrica. ¿Cuál es la verdadera significacion de estos resultados?

Para hacerse cargo de ellos, debe tenerse en cuenta que la medida de las temperaturas, tal como resulta de la construccion y graduacion del termómetro de mercurio, es necesariamente arbitraria ó convencional. Un grado centígrado indica, bien una dilatacion si la temperatura se eleva, ó bien una contraccion si baja, igual á la 6480.ª parte del volúmen del mercurio al hielo fundente, aunque en uno y otro caso interviene tambien la dilatacion ó contraccion del vidrio. Así pues, decir que el coeficiente de dilatacion de un cuerpo sube con la temperatura, es simplemente reconocer que la ley de dilatacion de este cuerpo no es, con respecto á aumentos iguales de temperatura, la misma que la ley de dilatacion del mercurio. Pero esto nada prejuzga relativamente á la ley, hasta aquí desconocida, que puede enlazar las indicaciones del

termómetro, ó las variaciones de volúmen de los sólidos medidos con las cantidades reales de calor que producen estos diferentes efectos.

Tambien sabemos ya que encontraremos divergencias semejantes en los líquidos, porque hemos visto que ciertos termómetros construidos y graduados segun el principio del termómetro de mercurio, pero llenados con líquidos diferentes, no concuerdan cuando se los somete á temperaturas distintas de las de los puntos fijos comunes. Los líquidos, pues, lo mismo que los sólidos no tienen los mismos coeficientes de dilatacion, y las dilataciones de aquellos obedecen á diferentes leyes que la del mercurio.

Es tanto más importante cerciorarse de estas diferencias y comprobarlas con medidas exactas cuanto que, al hablar de la dilatacion del mercurio ó de la de los demás líquidos, no hemos tenido en cuenta su *dilatacion real* ó *absoluta*, sino tan sólo su *dilatacion aparente*, puesto que no se han considerado las variaciones de volúmen que experimenta la envolvente que los contiene. La cantidad que ha resultado, $\frac{1}{6480}$, expresa la dilatacion aparente del mercurio, es decir, su dilatacion absoluta deducida la del cristal.

Muchos físicos, entre los cuales haremos mencion de Dalton, Cavendish, Deluc, Lavoisier y Laplace, han medido dicha dilatacion haciendo varios experimentos, pero sin pasar de la temperatura de 100°. Unas veces agregaban la dilatacion del vidrio á la aparente, y otras medían directamente la dilatacion absoluta, midiendo la altura del mercurio en el barómetro á una misma presion, pero á diferentes temperaturas. Dulong y Petit han resuelto esta cuestion por un método que vamos á describir sucintamente, basado en un principio muy sencillo que Boyle habia enunciado ya en los siguientes términos:

Cuando dos columnas verticales de un mismo líquido á dos temperaturas diferentes se equilibran, sus alturas están en razon inversa de sus densidades. Pero como estas densidades varian á su vez en razon inversa de los volúmenes, resulta que las variaciones de volúmen podrán medirse por las de altura.

Consideremos dos tubos verticales A B, que comunican por un tubo horizontal C D y que contienen mercurio. Si los dos tubos y el líquido contenido en ellos están á igual temperatura, á 0° por ejemplo, sus niveles superiores estarán á la misma altura vertical (fig. 38, 1). Supongamos ahora que continuando el tubo A á 0°, se eleva la temperatura del tubo B, y admitamos que el horizontal C D tenga un diámetro bastante pequeño para impedir la mezcla de las masas líquidas desigualmente calentadas. En tales condiciones, el nivel del mercurio subirá en B sobre el nivel del mismo líquido en A (fig. 38, 2), y llamando h y h' á las alturas de las dos columnas verticales sobre el eje del tubo horizontal, y d y d' á las densidades del mercurio, se tendrá, en virtud del principio más arriba enunciado, $\frac{d}{d'}=\frac{h'}{h}$. Si el volúmen del mercurio á 0° fuese V en el tubo B, seria V' á la nueva temperatura á que se ha elevado el líquido, con

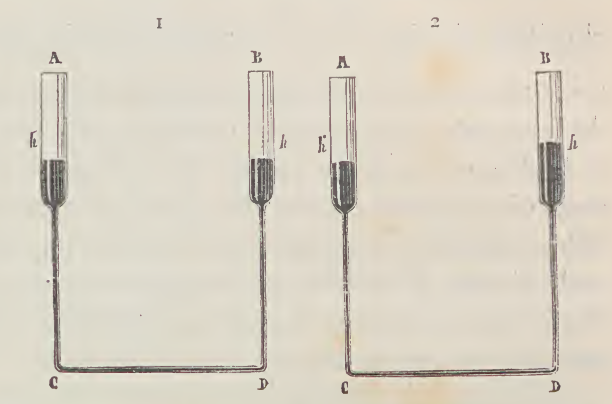


Fig. 38.—Principio del método de determinacion de la dilatacion absoluta de un líquido

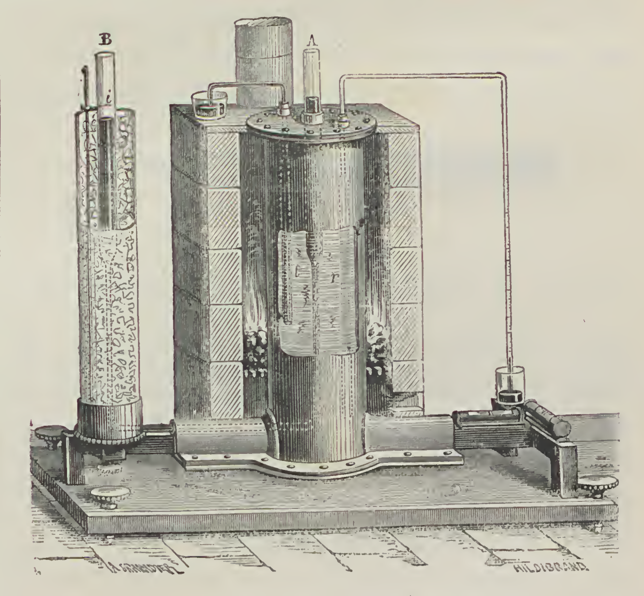


Fig. 39. — Aparato de Dulong y Petit para determinar la dilatacion absoluta del mercurio

lo cual resultaría $\frac{d}{d'}=\frac{V'}{V}$; de donde $\frac{V'}{V}=\frac{h'}{h}$ y por consiguiente $\frac{V'-V}{V}=\frac{h'-h}{h}$. Ahora bien, el primer término $\frac{V-V}{V}$ expresa la relacion entre el aumento de volúmen ó dilatacion absoluta del mercurio y este mismo volúmen á 0°. Esta es la dilatacion de la unidad de volúmen del mercurio para el número de grados comprendidos entre 0° y la temperatura á que se ha elevado el tubo B. Sea t° esta temperatura; dividiendo por t, se tendrá el *coeficiente de dilatacion absoluta del mercurio* para 1° entre 0° y t°.

Así pues, el método ideado por Dulong y Petit consiste en sustituir la medida de los volúmenes con la de las alturas de dos columnas verticales de mercurio desigualmente calentadas. Para tener toda la precision posible, sólo requiere dos condiciones esenciales: la primera consiste en medir rigurosamente la altura vertical de una columna de mercurio, así como la diferencia de esta altura con una columna vertical inmediata. La segunda condicion es determinar con exactitud la temperatura del mercurio de la columna calentada, continuando la otra á la temperatura del hielo fundente.

La figura 39 hará comprender cómo dispu-

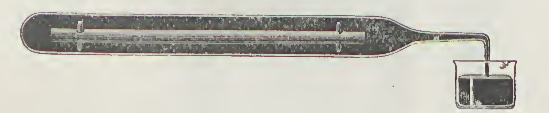


Fig. 40.—Dilatacion cúbica de los sólidos por el termómetro de peso

sieron Dulong y Petit sus experimentos, de modo que realizaran en lo posible ambas condiciones. El tubo horizontal que ponia en comunicacion los dos brazos verticales que contienen mercurio estaba fijo en una fuerte barra de hierro que descansaba en tres piés sobre una mesa de madera provista de tornillos de nivel. Unos niveles de aire servian para obtener la perfecta horizontalidad del tubo. Uno de los brazos verticales B estaba provisto de un manguito lleno de hielo machacado, y el montante que lo sostenia terminaba por su extremo superior en una punta i que servia de mira. El otro brazo A estaba rodeado de un manguito de cobre enteramente lleno de un aceite fijo, cuya temperatura podia elevarse hasta 300°. A este efecto, un hornillo (cuya mitad anterior se ha quitado en la figura 39) rodeaba por todas partes el manguito y servia para elevar su temperatura. Cuando se queria observar, se cer-

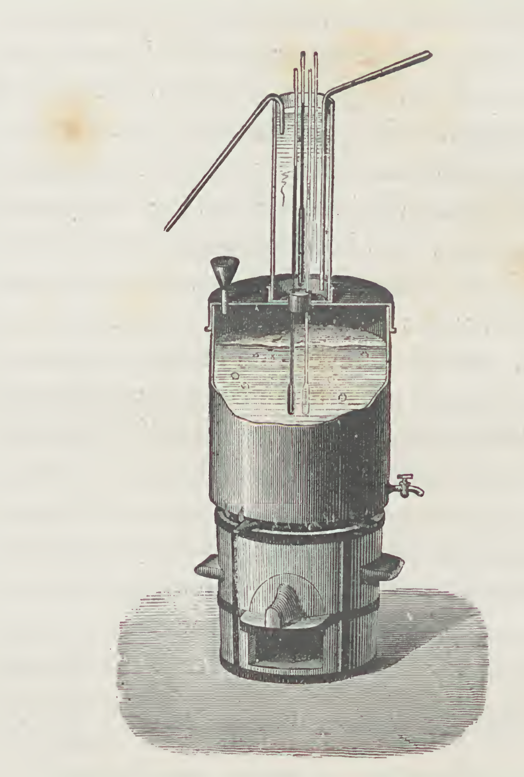


Fig. 41.—Aparato de M. Pierre para medir la dilatacion de los líquidos

raban todas las aberturas del hornillo y la temperatura del baño de aceite quedaba en breve estacionaria. Entónces con un catetómetro se determinaba la altura del punto de mira i, la del nivel del mercurio en el tubo B (observado al través de una ranura del manguito) y la del nivel del mercurio en el brazo A que sobresalia cosa de medio milímetro de la tapadera del manguito. De este modo se obtenia la diferencia de las alturas $h' - h$. Siendo 0° la temperatura del manguito de hielo machacado, sólo restaba conocer la del baño de aceite, marcada á la vez por un termómetro de mercurio, uno de peso y uno de aire. El promedio de sus indicaciones convenientemente corregidas daba la temperatura.

Despues de varias observaciones han averiguado Dulong y Petit el coeficiente de dilatacion absoluta del mercurio que resultó constante é igual á $\frac{1}{5550}$ por cada grado del termómetro comprendido entre 0° y 100°. Tambien reconocieron que este coeficiente se aumentaba

de un modo sensible con la temperatura á medida que esta pasaba de 100°.

Víctor Regnault ha reproducido despues los experimentos de estos sabios físicos, y basándose en el mismo principio, ha construido un aparato con el cual se evitan varias causas de error. Como las columnas de mercurio del aparato de Dulong y Petit sólo tenian de 50 á 60 centímetros, sus diferencias de nivel eran muy exiguas; en el aparato de Regnault su longitud es triple. La temperatura del aceite del manguito, calentado por abajo y no agitado, no era uniforme; en los nuevos experimentos un agitador remediaba este inconveniente. Los experimentos de Regnault han confirmado los resultados generales obtenidos por sus predecesores, dando al propio tiempo valores numéricos más exactos de los coeficientes de dilatacion del mercurio. El cuadro siguiente da los coficientes *medios* entre 0° y varias temperaturas y los coeficientes *verdaderos* para estas mismas temperaturas determinadas. Se observará que el coeficiente medio de 0° á 50° es igual á la fraccion $\frac{1}{5547}$ que es poco más ó ménos el número dado por Dulong y Petit de 0° á 100°. Así pues, entre los límites en cuestion, se continúa haciendo uso del valor $\frac{1}{5550}$, fácil de retener en la memoria.

DILATACION ABSOLUTA DEL MERCURIO

Coeficiente medio para las temperaturas

de 0° á 50°	0,00018027
de 0 á 100	0,00018153
de 0 á 150	0,00018279
de 0 á 200	0,00018405
de 0 á 250	0,00018531
de 0 á 300	0,00018658
de 0 á 350	0,00018784

Coeficiente verdadero

á 0°	0,00017901
á 50	0,00018152
á 100	0,00018305
á 150	0,00018657
á 200	0,00018909
á 250	0,00019161
á 300	0,00019413
á 350	0,00019666

El conocimiento de la dilatacion absoluta del mercurio ha permitido á Dulong y Petit averiguar la dilatacion cúbica de varios metales, como el hierro, el platino, el cobre, etc. Para este último metal, que ataca el mercurio, era preciso oxidar préviamente su superficie, para lo cual se servian de un tubo de vidrio de punta aguzada y curva, de la misma forma que el que sirve para el termómetro de peso.

Antes de soldar el vástago del tubo, se introduce en él un cilindro de metal con salientes de modo que sólo toquen las paredes en algunos puntos. Llénase el aparato de mercurio que se seca por ebullicion, luégo se le deja enfriar á 0°, sumergiendo la punta en mercurio seco. Entónces se le pesa y deduciendo del peso obtenido el del metal y el del tubo, se tiene el peso del mercurio introducido. Conocidas las densidades del metal y del mercurio á 0°, se deduce de ellas sus volúmenes, cuya suma es evidentemente igual á la capacidad interior del aparato á la misma temperatura de 0°.

Supongamos ahora que se eleva el todo á una temperatura T, metiendo el aparato en un baño de aceite á esta temperatura, y que luégo se recoge y se pesa el mercurio que sale por la punta. Claro está que el volúmen de mercurio salido es igual al aumento de volúmen del mercurio y del metal, deducido el de la envolvente. Escríbese esta igualdad ó esta ecuacion, en la cual no hay más que una incógnita, el coeficiente de dilatacion cúbica del metal, y cuya resolucion no ofrece por lo demás dificultad alguna.

Hemos visto que el coeficiente de dilatacion apararente del mercurio es igual á $\frac{1}{6480}$; el de la dilatacion absoluta á $\frac{1}{5550}$. La diferencia $\frac{1}{5550} - \frac{1}{6480}$ dará la dilatacion de la envolvente ó del vidrio para los mismos límites de temperatura 0° y 100°. El cálculo da $\frac{1}{38700}$ ó en decimales 0,0000258, que es la dilatacion cúbica del vidrio blanco á base de sosa.

II

DILATACION CÚBICA DE CUALESQUIERA LÍQUIDOS

Acabamos de ver cómo, una vez conocida la dilatacion absoluta del mercurio, se puede deducir de ella la del vidrio, basándose en la sencilla relacion de que la dilatacion aparente de

un líquido es sensiblemente igual á su dilatacion absoluta deducida la de la envolvente que lo contiene. La misma relacion va á permitirnos ahora medir la dilatacion absoluta de los líquidos sin necesidad de hacer de nuevo los delicados experimentos que han servido para el mercurio.

Con tal objeto se hace uso de una envolvente barométrica graduada en divisiones de capacidad igual, como se hace para construir un termómetro patron, y se mide exactamente el volúmen del depósito tomando por unidad una de estas partes. Introdúcese en él el líquido que se ha de estudiar; se mete el aparato en un manguito que contiene hielo fundente; se anota la division á la que sube el nivel, y de este modo se tiene el volúmen del líquido á 0°. Hecho esto, se le pasa á un baño de temperatura conocida, y se anota tambien la division del tubo á la cual llega el líquido, deduciéndose de aquí el volúmen á esta nueva temperatura. La diferencia de los volúmenes referida al volúmen á cero da la dilatacion aparente del líquido en el vidrio de la envolvente. Si se ha determinado préviamente la dilatacion del vidrio, una simple suma dará la dilatacion real para el intervalo de las temperaturas observadas.

Deluc fué el primero que hizo experimentos exactos sobre este asunto, aunque á la verdad sin tener en cuenta la dilatacion de las envolventes, que creia despreciable en comparacion de la de los líquidos; y reconoció que si se calcula la dilatacion para un grado, no es constante, sino que crece á medida que la temperatura se eleva. Gay-Lussac, Thomson, Dalton, y últimamente Isidoro Pierre han estudiado la dilatacion de los líquidos de varios modos. El método de que se ha valido este último para estudiar la de muchos líquidos diferentes, es el que hemos resumido más arriba, y la figura 41 representa el aparato que ha discurrido para estas investigaciones. El tubo termométrico que contiene el líquido penetra en un baño de agua ó de aceite de que está casi lleno un depósito cilíndrico puesto sobre un hornillo. Al lado hay un termómetro de mercurio que marca la temperatura del baño. Las partes exteriores de los tubos están á su vez metidas en un manguito lleno de agua, y un segundo termómetro marca la temperatura de esta agua, para que se puedan hacer las correcciones necesarias á causa de que las envolventes termométricas no están en todos sus puntos sometidas á la temperatura del baño. Con unos agitadores se reparte uniformemente el calor en todas las partes de los depósitos. Antes de empezar las observaciones se ha de tomar una precaucion importante: purgar bien de aire el líquido que se ha de estudiar, lo cual se consigue por ebullicion ó, si el líquido es demasiado volátil, con la máquina neumática.

El coeficiente de dilatacion varia para un mismo líquido con la temperatura, y va creciendo con arreglo á una ley que sólo la experiencia permite formular y que difiere mucho de un líquido á otro. Thomson ha observado que por lo general los líquidos más dilatables son aquellos cuya temperatura de ebullicion es ménos elevada. Sin embargo, esta ley no es absoluta. Hé aquí, segun M. I. Pierre, la dilatacion de algunos líquidos á 0° y en el punto de ebullicion de cada uno de ellos:

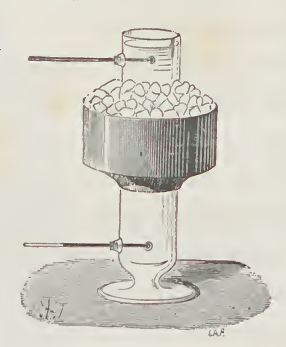


Fig. 42. — Experimento que prueba que el agua se contrae de 0° á 4°

SUSTANCIAS	COEFICIENTE DE DILATACION		
	A 0°	en el punto de ebullicion	temperatura de ebullicion
Alcohol.	0,0010486	0,0011955	78°,3
Éter sulfúrico. . .	0,0015132	0,0016474	35°,5
Sulfuro de carbono.	0,0011398	0,0012493	47°,9
Licor de los holandeses.	0,0011189	0,0012824	84°,9
Bromo.	0,0010382	0,0011677	63°,0
Alcohol metílico. .	0,0011856	0,0013297	63°,0
Cloruro de silicio.	0,0012941	0.0015635	59°,0
Cloroformo.	0,0011071	0,0013205	63°,5
Esencia de trementina.	0,0008474	0,0280800	150°,0

Comparando la dilatabilidad de varios líquidos con su compresibilidad, se ha creido reconocer que los que se comprimen más fácilmente son tambien aquellos que tienen mayor coeficiente de dilatacion. Son pocos los líquidos cuya compresibilidad se ha medido. Poniendo por órden de dilatabilidad (media entre 0° y 100°) algunos de ellos, se tiene la serie siguiente: éter, alcohol, esencia de trementina, cloroformo,

agua, mercurio, serie que no difiere de la en que están colocados por órden de compresibilidad sino por el punto ocupado por el cloroformo, que del cuarto pasa al segundo. En los sólidos se observa parecida relacion, puesto que los más compresibles suelen ser tambien los más dilatables.

Por lo demás. se puede comprender la fuerza prodigiosa que el calor ejerce en las moléculas de los cuerpos para separarlos, calculando los esfuerzos que seria preciso ejercer para volver un cuerpo dilatado al volúmen que ocupaba ántes que el calor modificara este volúmen. Por ejemplo, la elevacion de temperatura del mercurio de 0º á 30º produce una dilatacion total de 0,0053928. Ahora bien, la compresibilidad de este líquido es igual á 0,00000295, es decir que la presion de una atmósfera disminuye su volúmen en 295 cienmillonésimas. Así pues, para volver este volúmen á 0º ó más bien para oponerse á la dilatacion producida por la elevacion de temperatura de 0º á 30º, seria menester ejercer en el líquido la enorme presion de 1828 atmósferas. La contraccion ocasionada por el descenso de un solo grado equivale á una presion que varia entre 60 y 66 atmósferas, segun que el punto de partida es la temperatura 0º ó la de ebullicion del mercurio.

III

DILATACION DEL AGUA.—TEMPERATURA DE SU MÁXIMUM DE DENSIDAD

En el artículo anterior no hemos dicho nada en especial del líquido más comun en la naturaleza, y cuyo modo de obrar nos importa más particularmente conocer cuando se le somete á la accion del calor: en una palabra, del agua. Y es que el agua, por una excepcion singular, no se dilata, cuando se la calienta, en todos los grados de la escala termométrica. Cuando se eleva la temperatura á partir de su punto de fusion ó de 0º, empieza por contraerse hasta los 4º próximamente, desde los cuales se va dilatando cada vez más con arreglo á la ley que hemos visto respecto de los otros líquidos.

Los físicos de la Academia del Cimento observaron por primera vez esta anomalía hácia 1670; considerando el nivel del agua contenida en un tubo termométrico y á la que enfriaban, vieron que el nivel del líquido, que al principio habia bajado, se puso de nuevo á subir un poco ántes de llegar á la congelacion. Más adelante Hooke atribuyó este fenómeno á un crecimiento más rápido de la contraccion del vidrio, opinion que, adoptada al pronto por varios sabios, fué combatida por Blagden, el cual habia observado un máximum de densidad análogo en una mezcla de agua y sal. Como esta mezcla no se congela sino á una temperatura inferior á 0º y el punto del máximum de condensacion se halla



Fig. 43. —Gay-Lussac

á igual distancia de la congelacion que para el agua pura, el fenómeno pareció verosímilmente independiente del tubo.

El siguiente experimento, discurrido por el físico escocés Hope y que se reproduce aún en las cátedras de física, pone fuera de duda esta independencia y prueba que el fenómeno es efectivamente propio del agua misma. Se mete en un cilindro lleno de hielo la parte superior de una probeta llena de agua á una temperatura que exceda de 4º y que por encima y debajo del cilindro lleve dos termómetros horizontales (figura 42). Los depósitos de estos termómetros indican á cada momento la temperatura de la capa de agua que los rodea. Hé aquí, pues, lo que ocurre y lo que se comprueba fácilmente. Las capas superiores del agua se enfrian poco á poco y de una manera continua, y el termómetro metido en ella desciende de 4º á 0º, al paso que el termómetro inferior, despues

de bajar á 4° se queda estacionado. Este experimento muestra que las capas más elevadas, al enfriarse á 4°, permanecen en la parte superior, como lo prueban las indicaciones de los dos termómetros, lo cual denota su mayor ligereza específica.

Este experimento basta para comprobar el hecho, más no para determinar con exactitud la temperatura precisa del punto en que el agua adquiere su máximum de densidad, lo cual se ha conseguido por varios métodos, consistentes los unos en tomar la densidad del líquido haciendo variar la temperatura á una y otra parte del punto crítico, y los otros en buscar directamente la dilatacion del agua mediante la comparacion de termómetros de agua y de mercurio, lo cual exige, conforme hemos visto, el conocimiento exacto de la dilatacion absoluta del mercurio. Valiéndose Hallstrom del primer método ha deducido 4°,1 como temperatura del máximum de densidad. Despretz, empleando el segundo, ha hallado 4° exactamente. M. Frankenheim ha tomado por base las investigaciones de Isidoro Pierre, y deducido la cantidad 3°,9. Vese pues que 4° es el promedio de los tres resultados. Como la dilatacion varía con mucha lentitud á una y otra parte del punto en que se llega al máximum, compréndese que sea difícil decidir qué número es el más exacto. El cuadro siguiente, tomado de la obra de Despretz, indica los volúmenes y densidades del agua á varias temperaturas sobre y bajo cero, siendo la unidad de volúmen y de densidad la del agua á 4° (1).

Temperaturas	Volúmenes	Densidades
— 5°	1,0006987	0,999302
— 4	1,0005619	0,999437
— 3	1,0004222	0,999577
— 2	1,0003077	0,999692
— 1	1,0002138	0,999786
0	1,0001269	0,999873
1	1,0000730	0,999927
2	1,0000331	0,999966
3	1,0000083	0,999999
4	1,0000000	1,000000
5	1,0000082	0,999999
6	1,0000309	0,999969
7	1,0000708	0,999929
8	1,0001216	0,999878
9	1,0001870	0,999813
10	1,0002684	0,999731
15	1,0008951	0,999125
100	1,04315	0,958634

(1) Más adelante veremos que se puede bajar la temperatura del agua hasta 12° bajo cero sin que esta se solidifique; sino que continúa dilatándose hasta dicha temperatura extrema. El cuadro siguiente da, hasta — 5°, el valor de esta dilatacion del agua no congelada y de su densidad decreciente hasta el mismo límite. Por el contrario, el hielo se contrae á estas mismas temperaturas.

El agua de mar tiene un máximum de densidad lo propio que la pura, sucediendo lo mismo con algunas disoluciones salinas acuosas. Pero Despretz ha reconocido que en estos líquidos la temperatura del máximum baja más rápidamente que el punto de congelacion. El agua de mar, que se congela á — 1°,70, tiene su máximum de densidad á — 3°,67; una disolucion de sal marina cuyo punto de congelacion es — 2°,12, tiene su máximum á — 4°,75. Así pues, para que se pueda observar el máximum es menester tomar las precauciones necesarias para poner el líquido á dicha temperatura sin que cambie de estado. Estando siempre agitada el agua del mar, la congelacion sobreviene ántes que se enfrie lo bastante para llegar á la temperatura más baja del máximum.

IV

TEMPERATURA DE LOS LAGOS PROFUNDOS.—NEVERAS

Así pues, todos los líquidos, excepto el agua y algunas disoluciones acuosas, se contraen al enfriarse hasta el punto en que, segun más adelante veremos, cambian de estado y se solidifican, propiedad que origina en la naturaleza ciertos fenómenos de los que vamos á tratar ligeramente.

El primer fenómeno es la constancia de la temperatura del agua, en toda estacion, en el fondo de los lagos de gran profundidad. Saussure ha comprobado que esta temperatura es igual á 4°, es decir, precisamente la del máximum de densidad del agua. La explicacion de esto es sencilla, si se tiene en cuenta el hecho de la condicion de equilibrio de los líquidos superpuestos, la cual exige que las capas estén colocadas de arriba abajo por órden de densidades crecientes. El experimento de Hope, anteriormente descrito, muestra en pequeña escala lo que sucede en grande en la naturaleza.

En efecto, cuando al acercarse el invierno el descenso de temperatura hace que las capas superficiales del lago se enfrien hasta 4°, estas capas se vuelven más densas que las que tienen debajo, por lo cual descienden al fondo y

las reemplazan otras más calientes y ligeras que se enfrian y bajan á su vez. De esta suerte y poco á poco las capas profundas del lago quedan constituidas por agua á 4°; y si el enfriamiento de la superficie continúa de 4° á 0°, es evidente que el equilibrio se establecerá de modo que el agua más fria ó ménos densa sea precisamente la que ocupe los puntos más elevados, al ir creciendo la temperatura desde un punto próximo á 0° hasta 4°, que será la de las capas más profundas.

El lago podrá congelarse superficialmente, en mayor ó menor espesor, pero no cesará el equilibrio de que acabamos de hablar.

Si el lago es de escasa profundidad, el descenso de temperatura de la superficie podrá llegar poco á poco á las capas inferiores, que entónces, en lugar de permanecer á 4°, podrán bajar á 3°, á 2°, etc., pero conservando el órden de superposicion que deja en el fondo el agua más caliente y tambien la más densa, miéntras se encuentre en los límites comprendidos entre 0° y 4°.

Cuando, al volver los calores, las capas superficiales del lago recobran una temperatura más elevada, la comunican muy despacio á las inferiores, comunicacion que, suponiendo una gran profundidad, no tiene tiempo de llegar al fondo ántes de que vuelva el invierno.

Segun los sondeos termométricos efectuados hace algunos años en los lochs escoceses por M. Buchanan, parece que la observacion no confirmaba completamente los resultados obtenidos por Saussure. M. Buchanan vió, en el Loch Lomon, que la temperatura del agua, que era de 0° á la superficie, se elevaba gradualmente hasta 2°,4 á 20 metros de profundidad, pero sin subir más. M. Forel ha hecho indagaciones con el mismo objeto, durante el invierno de 1879-1880, en los lagos de Morat y de Zurich: hé aquí los resultados de sus trabajos, siendo las deducciones que de ellos ha hecho enteramente conformes á la explicacion hasta entónces adoptada, como se va á ver:

«1. *Lago de Morat.* — Superficie, 27^{kil},4; profundidad máxima, 45 metros. El lago se heló en la noche del 17 al 18 de diciembre. Espesor del hielo el 23 de diciembre, 11 centímetros; el 1.° de febrero, 36 centímetros.

Profundidad en metros	Temperatura el 28 diciembre 1879	Temperatura el 1.° febrero 1880
0	0°,36	0°,35
5 . . .	1°,60	1°,90
10 . . .	2,°00	2°,00
15 . . .	2°,23	2°,45
20 . . .	2°,46	2°.50
25 . . .	2°,60	2°,50
30 . . .	2°,66	2°,40
35 . . .	2°,75	2°,55
40 . . .	2°,70	2°,70
Promedios. .	2°,15	2°,15

»2. *Lago de Zurich.* — Superficie, 87^{kil},8; profundidad máxima, 141 metros. El lago se heló dos dias á fines de diciembre; y luégo de nuevo y definitivamente el 21 de enero. Espesor del hielo el 25 de enero, 10 centímetros.

Profundidad	Temperatura	Profundidad	Temperatura
0^{m}. . .	0°,2	70^{m}. . .	3°,7
10^{m}. . .	2°,6	80^{m}. . .	3°,8
20^{m}. . .	2°,9	90^{m}. . .	3°,8
30^{m}. . .	3°,2	100^{m}. . .	3°,9
40^{m}. . .	3°,5	110^{m}. . .	3°,9
50^{m}. . .	3°,6	120^{m}. . .	4°,0
60^{m}. . .	3°,7	133^{m}. . .	4°,0

»Del estudio de estas cifras deduzco las conclusiones siguientes:

»1.° La antigua teoría de la congelacion de los lagos, que admite un enfriamiento progresivo de toda la masa hasta á 4° C, y luégo otro de las capas superficiales que se estratifican de 4° á 0° segun su órden de densidad, es exacta.

»2.° La penetracion del frio en las capas superficiales puede bajar hasta 110 metros de profundidad (lago de Zurich).

»3.° M. Buchanan ha hallado 2°,4 y no 4° en el Loch Lomon á causa de la escasa profundidad de este.»

Otro fenómeno natural cuya explicacion se relaciona con el hecho del máximum de densidad del agua á 4°, es el de los *pozos de hielo.* Dáse este nombre á unas cavidades de forma generalmente cilíndrica que se encuentran, en los Alpes, en la superficie de las masas de hielo que constituyen los glaciares. Examinando el fondo de estos pozos, se ve siempre un cuerpo sólido, como una piedra, un madero, hojas, etc. Véase cómo se explica la formacion de una de estas cavidades. La superficie del hielo, expuesta á los rayos solares, se funde uniforme, pero lentamente, cuando la temperatura del aire es

inferior á 0°; pero si penetra en el hielo un cuerpo extraño, el calor del sol eleva su temperatura y derrite el hielo debajo y alrededor de él con mayor rapidez que en los demás puntos.

Fórmase pues debajo del cuerpo una cavidad que se llena de agua de fusion. La temperatura de esta, allí donde está expuesta á la radiacion solar, sube poco á poco hasta 4°, y como su densidad aumenta, baja al fondo de la cavidad y la reemplaza el agua más fria y ligera. Por su contacto con el hielo, le cede una parte de su calor, y produce nueva cantidad de agua de fusion; pero, enfriándose tambien, se torna más ligera y sube á la superficie. Así pues, una vez formada la cavidad aumenta progresivamente en profundidad, y el cuerpo extraño que la ha dado nacimiento queda en el fondo, atestiguando con su presencia el orígen y la causa del fenómeno.

CAPITULO V

DILATACION DE LOS GASES

I

MEDIDA DEL COEFICIENTE DE DILATACION DE LOS GASES POR EL MÉTODO DE GAY-LUSSAC

Que la dilatacion de los gases sea, para una misma elevacion de temperatura, mucho mayor que la de los líquidos y con mayor motivo que la de los sólidos, es un hecho conocido de muy antiguo y que explica por qué los primeros termoscopios ideados estaban fundados en la dilatacion del aire. En virtud de un fácil experimento se sabia que un globo cerrado y lleno de aire se rompe cuando se eleva demasiado su temperatura, y que una vejiga se infla y revienta en las mismas circunstancias. Las medidas que hemos dado ya de los coeficientes de dilatacion de los sólidos y los líquidos, nos han hecho ver que el volúmen del mercurio, el más dilatable de los segundos, aumenta en 179 diezmilésimas cuando se le calienta de 0° á 100°, al paso que el del metal más dilatable, el zinc, sólo aumenta en 102 diezmilésimas para igual elevacion de temperatura. El aire, en iguales condiciones, se dilata 3665 diezmilésimas, más del tercio de su volúmen primitivo; casi 36 veces tanto como el zinc, y más de 20 que el mercurio. Esta proporcion es poco más ó ménos la misma para todos los gases, conforme vamos á verlo al describir los principales procedimientos que han servido á los físicos para determinar sus coeficientes de dilatacion. Gay-Lussac, á quien corresponde el honor de haber hecho las primeras determinaciones exactas, halló para todos los gases una cifra mucho mayor que la que hoy se admite.

Antes de la época de este ilustre físico habíanse hecho ya varias tentativas con objeto de medir la dilatacion de los gases, entre otras las de Hauksbee y Amontons, Priestley, Monge y Berthollet, Guyton y Prieur; pero las conclusiones de estas indagaciones multiplicadas no concordaban entre sí. Hoy sabemos que la divergencia de los resultados consistia en gran parte en la insuficiencia de los procedimientos de desecacion de los gases; la humedad que conservaban en los experimentos, y la formacion de vapores por efecto del calor, eran causas de perturbacion y de error á la sazon inevitables. Segun dice Lamé atinadamente, «no se conocian entónces las leyes de formacion de los vapores, y esta circunstancia descuidada impedia que los experimentos fuesen comparables entre sí.» Gay-Lussac en Francia y Dalton en Inglaterra fueron los primeros que lograron descubrir las leyes de dilatacion de los gases; y por largo tiempo se consideró que el primero habia dado las verdaderas fórmulas y el valor verdadero del coeficiente de dilatacion comun. Hé aquí el enunciado de las tres leyes que cada cual dedujo por su parte, y que han sido conocidas largo tiempo en la ciencia con el nombre de leyes de Gay-Lussac:

PRIMERA LEY: *Todos los gases se dilatan uniformemente de* 0 *á* 100 *grados.*

SEGUNDA LEY: *La dilatacion de los gases es independiente de la presion.*

TERCERA LEY: *La dilatacion comun de los gases entre* 0 *y* 100 *grados es las* 375 *milésimas de su volúmen á* 0°, *ó bien su coeficiente de dilatacion es igual por* 1 *grado á* 0,00375, *es decir, á* $\frac{1}{267}$.

Véase cómo preparaba sus experimentos el ilustre físico. Tomemos por ejemplo el que tenia por objeto la dilatacion del aire (fig. 44).

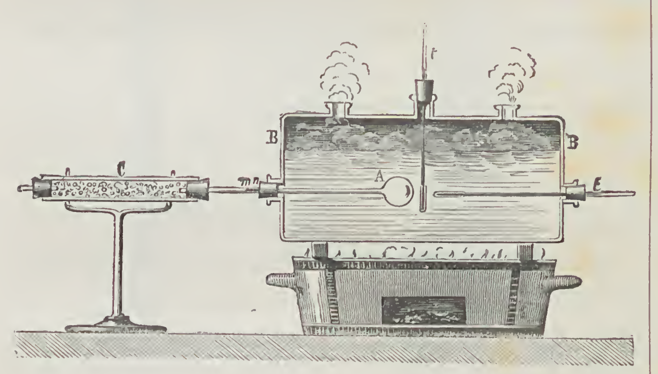


Fig. 44. — Aparato de Gay-Lussac para medir la dilatacion de los gases

Habiendo arreglado un tubo termométrico provisto de un depósito esférico y de un largo vástago perfectamente calibrado, y dividido en toda su longitud en partes de igual capacidad, calculó, conforme hemos visto al describir el termómetro, la relacion exacta de la capacidad de una division con la del depósito. Entónces lo llenó de mercurio, que sometió á la ebullicion para purgarlo enteramente de aire y de humedad. En tal estado, ajustó el vástago al extremo de un largo tubo C lleno de cloruro de calcio, é invertido luégo verticalmente. Introduciendo un hilo de platino en el vástago é imprimiendo algunas sacudidas, el mercurio salia del tubo, donde lo iba reemplazando el aire que se deslizaba en el espacio comprendido entre el hilo de platino y el mercurio. Se retiraba el hilo cuidando de dejar una gota de mercurio que sirviera de índice, y el depósito quedaba así lleno de aire seco por su paso al través del cloruro de calcio. Preparado el tubo de tal suerte, lo introducia en una cubeta BB, llena de hielo en fusion ó á 0°; se anotaba la posicion del índice, y en seguida se ponia la cubeta en un hornillo para elevar su temperatura. Dos termómetros *t t* marcaban esta, y la marcha del índice, que se veia por fuera, daba la medida de la dilatacion para temperaturas más y más elevadas. Gay-Lussac tenia así los volúmenes de una misma masa de aire á 0° y á un número de grados T. Deduciendo de este último volúmen la dilatacion del vidrio, sacaba en consecuencia la dilatacion verdadera del gas para T grados y por consecuencia para 1 grado, es decir, el coeficiente medio de dilatacion entre 0 y T. Si la presion barométrica no variaba miéntras duraba el experimento, no era menester hacer correccion alguna por este concepto; en caso contrario, habia que referir el segundo volúmen medido á la presion observada al principio.

Operando así, Gay-Lussac halló una dilatacion uniforme entre 0° y 100°, y un coeficiente de dilatacion para todos los gases, en estos límites. Davy fué quien reconoció que la dilatacion es independiente de la presion.

Dalton habia obtenido á corta diferencia el mismo resultado en lo que se refiere al valor del coeficiente de dilatacion, que halló igual á 0,00372; pero él lo interpretaba de otro modo, admitiendo que la dilatacion seguia una progresion geométrica, en vez de seguirla aritmética, segun Gay-Lussac.

Posteriormente á este físico, Dulong y Petit, y luégo Pouillet hicieron nuevos estudios sobre el mismo asunto. Los dos primeros comprobaron la primera ley de Gay-Lussac, con el aire y el hidrógeno, desde 37° bajo cero hasta 360°. Habiéndola hallado exacta en estos límites respecto de gases tan diferentes como el aire y el hidrógeno, se la admitió con mayor motivo para todos los demás. Pero los mismos físicos observaron que para un mismo gas, la uniformidad de dilatacion, exacta entre — 36° y 100°, no lo es ya á temperaturas mayores, medidas siempre con el termómetro de mercurio. A partir de 100°, las dilataciones tienen valores decrecientes para aumentos iguales de temperatura, lo cual debe interpretarse únicamente en el sentido de que la dilatacion más allá de 100° no es la misma para el mercurio que para los gases: un termómetro de mercurio indicaria temperaturas más altas que uno de gas.

II

DILATACION DE LOS GASES.—EXPERIMENTOS DE V. REGNAULT

En tal estado se hallaba la ciencia, con respecto á este asunto, en 1835, época en que el físico sueco Rudberg, profesor en la universidad de Upsal, hizo varias investigaciones que tendieron á probar que las leyes de Gay-Lussac no eran tan exactamente rigorosas como se habia creido hasta entónces. Tomando mayores precauciones para secar el aire en el cual operaba, Rudberg dedujo una cifra muy distinta de la que hasta entónces se habia admitido para el coeficiente de dilatacion: halló 0,00365 en vez de 0,00375.

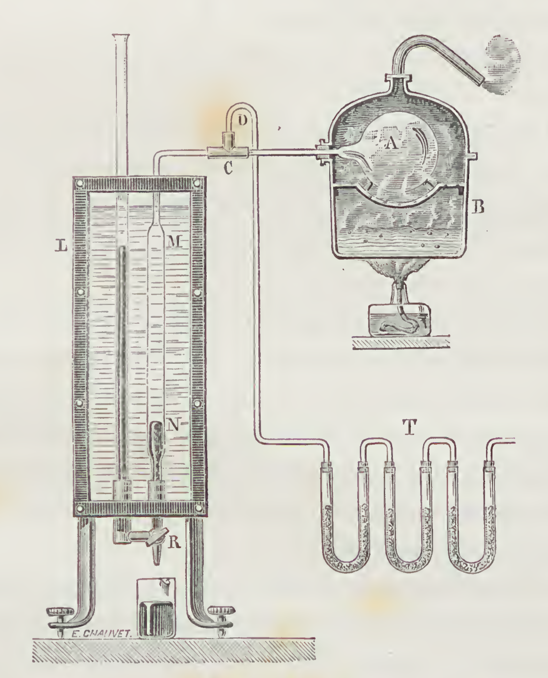


Fig. 45.—Aparato Regnault para medir la dilatacion de los gases á presion constante

Pero V. Regnault estudió á su vez los experimentos de Rudberg, y en el detalle de las operaciones notó causas de error que hasta entónces no se habian podido tener en cuenta. Resolvió pues emprender de nuevo los estudios de Gay-Lussac, hacerlos extensivos á todos los gases, y discurrió con este objeto procedimientos y aparatos más perfectos, que le dieron los resultados que vamos á indicar brevemente, dando una sucinta idea de los métodos nuevos.

El globo A (fig. 45), destinado á contener el aire ó los gases que se han de estudiar, está colocado en una vasija de laton que se llenará primero de hielo, y luégo de agua que con una lámpara de alcohol se puede calentar hasta la temperatura de la ebullicion. El angosto tubo en que remata el globo se puede poner en comunicacion, en C, con un manómetro de aire libre M N, y de otra parte, por un tubo D, con una serie de tubos T que contienen sustancias desecantes, como cloruro de calcio, piedra pómez empapada en ácido sulfúrico, etc. Con una bomba de mano se hace el vacío en el globo al través de los tubos T, y se introduce en él aire que pierde su humedad por este paso. Repítese la operacion cierto número de veces, y en seguida se deja algunos instantes el globo en comunicacion con la atmósfera, de modo que la presion del gas interior sea precisamente igual á la atmosférica: entónces se cierra á la lámpara, en D, el tubo de comunicacion. El globo A, lleno de gas perfectamente seco y sin vestigio de humedad en sus paredes, queda sólo en comunicacion con el manómetro, cuyos dos brazos tienen el mercurio al mismo nivel.

Se echa mercurio en el brazo abierto del manómetro, ó se le quita del otro brazo por la llave R, hasta que el nivel comun toque á un punto de referencia M, con lo cual se tiene un volúmen de gas determinado y conocido á 0°, puesto que durante todas estas operaciones la vasija estaba llena de hielo en fusion y á la presion atmosférica conocida por el barómetro.

Terminada esta primera fase del experimento, se procede á la segunda. Quítase el hielo de la vasija, y en su lugar se pone agua que se hace hervir. El gas se dilata, repele el mercurio al brazo M del manómetro hasta un punto N, y entónces se equilibra el nivel en los dos brazos del manómetro dejando salir mercurio por la llave R. De este modo la presion del gas es siempre igual á la exterior, pero su volúmen ha variado y se puede medir fácilmente el aumento de volúmen en el tubo M N dividido préviamente en partes de igual capacidad. Conócese por otra parte la temperatura de esta parte del gas; la cual es la del agua que lo rodea en la caja L. Entónces se puede plantear una ecuacion merced á la cual se calcula el coeficiente de dilatacion del gas á *presion constante* y *volúmen variable*.

Valiéndose M. Regnault de otro método, del que vamos á decir cuatro palabras ha obtenido resultados que no son idénticos á los del primero, áun cuando la diferencia no es mucha. La pre-

paracion del gas, así como la determinacion de su volúmen y de su presion á 0°, se hacian del mismo modo que en el experimento anterior, y la disposicion del aparato sólo diferia en la del manómetro, cuyos brazos tenian el mismo diámetro y no estaban rodeados de agua. La figura 46 hará comprender sin necesidad de nueva

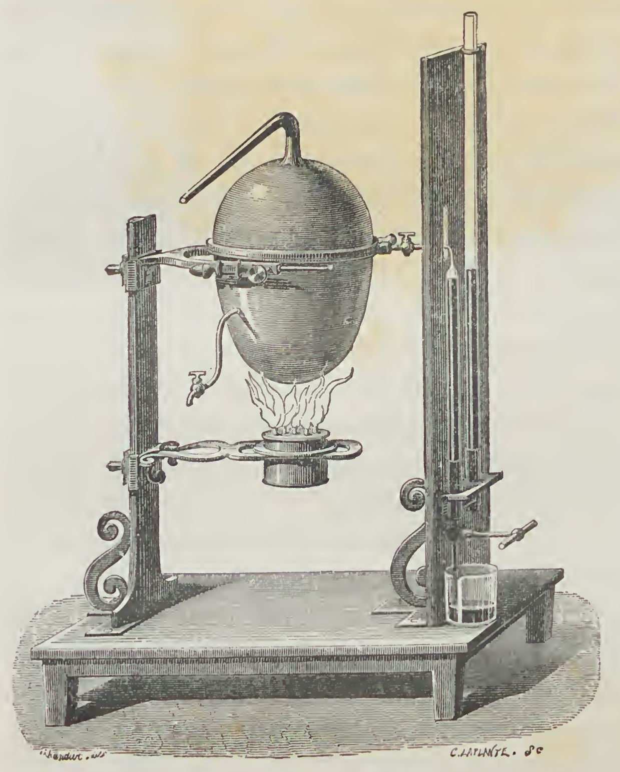


Fig. 46.—Aparato Regnault para medir la dilatacion de los gases de volúmen constante

explicacion la primera fase de la operacion. La segunda fase consiste en calentar la vasija, cuyo hielo ha sido reemplazado con agua, y en hacer que ésta hierva. El gas dilatado rechaza el mercurio del manómetro, cuyo nivel tocaba, á 0°, en un punto de referencia marcado. Echando mercurio por el brazo abierto del manómetro, se lleva á dicho punto de referencia el nivel del mercurio del segundo. Se mide la diferencia de nivel y se agrega la presion exterior, que ha podido cambiar miéntras tanto. Así pues, el volúmen del gas ha permanecido constante, en estas fases del experimento. Se le refiere á lo que seria á 0° mediante una fórmula muy sencilla en que entra el coeficiente de dilatacion buscado, así como el coeficiente de dilatacion del vidrio. Y como en la hipótesis de la exactitud de la ley de Mariotte, los volúmenes de un mismo gas, á temperatura igual, deben ser inversamente proporcionales á las presiones, se puede plantear una ecuacion que permite calcular el coeficiente ó la incógnita del problema.

Segun se ve, lo que se hace variar en este segundo método es la presion, al paso que el volúmen permanece sensiblemente constante (la diferencia sólo procede de la dilatacion del vidrio): es pues la dilatacion á volúmen constante y á presion variable.

Hé aquí los principales resultados obtenidos por Regnault con uno ú otro método:

COEFICIENTES DE DILATACION DE LOS GASES ENTRE 0° Y 100°

Gases	A volúmen constante	A presion constante
Aire.	0,003665	0,003670
Hidrógeno.	0,003667	0,003661
Nitrógeno.	0,003668	»
Oxido de carbono. . .	0,003667	0,003669
Protóxido de ázoe. . .	0,003676	0,003719
Acido carbónico. . .	0,003688	0,003710
Cianógeno.	0,003829	0,003877
Acido sulfuroso. . .	0,003845	0,003903

El cuadro anterior demuestra que los coeficientes de dilatacion de los gases varían de un gas á otro, segun el método empleado para determinarlos. Además, distan de ser iguales para todos los gases. El valor encontrado por Gay-Lussac para el aire, entre 0° y 100°, debe rebajarse bastante. En lugar de ser 0,00375 ó la fraccion $\frac{1}{267}$, es 0,003665 ó la fraccion $\frac{1}{270}$. Regnault ha comprobado además que el coeficiente no es independiente de la presion ó de la densidad inicial; excepto por lo que hace al hidrógeno, aumenta con la presion. El coeficiente del aire, por ejemplo, aumenta de 0,003648 á 0,003709, cuando la presion crece de 109 milímetros á 3655.

Así pues, las leyes formuladas por Gay-Lussac no son exactas. Conviene, sin embargo, observar que, respecto de los gases que no se habia podido aún licuar, y que por esta razon se les llamaba *permanentes*, como el aire, el nitrógeno ó ázoe, el hidrógeno, el óxido de carbono, etc., la diferencia de los coeficientes sólo está en la última cifra, pudiéndose decir que para todos es igual á 0,00367 ó á $\frac{1}{273}$. Así tambien la variacion con la presion no es bien perceptible sino en los gases liquefiables. Por lo demás, estos resultados concuerdan con lo que se sabe acerca

de la inexactitud de la ley de Mariotte. «Es probable, dice M. Jamin, que si todos los gases siguieran la ley de Mariotte, tendrian una dilatacion comun, igual poco más ó ménos á la del hidrógeno é independiente de su presion; pero como observan una ley de compresibilidad más rápida por lo general, que varía con su naturaleza y que decrece cuando su temperatura aumenta, poseen una dilatacion desigual, tanto mayor cuanto más compresibles son, y que crece con la presion, por lo cual hay que distinguir dos coeficientes, uno de volúmen constante, y



Fig. 47.—Víctor Regnault

otro de presion constante. Sin embargo, si esta es la verdad experimental, se ha podido observar que las diferencias entre las distintas dilataciones son muy escasas.» Verdet venia á deducir lo mismo cuando decia: «Es probable que el enrarecimiento y la elevacion de temperatura tienden á aproximar un gas cualquiera á un *estado gaseoso perfecto*, en el que seguiria rigurosamente la ley de Mariotte y en que sus dos coeficientes de dilatacion serian iguales é independientes de la presion. Tambien es probable que el valor comun de estos dos coeficientes de dilatacion seria independiente de la naturaleza de los gases.»

Al presentar Regnault en 1842 los resultados de sus experimentos á la Academia de Ciencias, y al demostrar que no confirmaban las dos leyes fundamentales de la teoría de los gases, tal cual el genio de Gay-Lussac las descubriera, decia: «¿Hay que deducir de esto que en adelante se han de desterrar esas leyes de la ciencia? No soy de esa opinion. Creo que á dichas leyes, lo propio que á cuantas se han reconocido acerca de los gases, la ley de los volúmenes, etc., se las debe considerar como verdaderas *hasta cierto límite*, es decir, que estarán más á punto de convenir con los resultados de la observacion cuanto en mayor estado de dilatacion se tomen los gases. Estas leyes se aplican á un estado gaseoso perfecto al cual se acercan más ó ménos los gases que nos presenta la naturaleza, segun su naturaleza química, segun la temperatura á que se les considere y que puede distar más ó ménos de los puntos en que hay cambio de estado, y por último, segun su estado de mayor ó menor compresion.»

Lo que el ilustre físico dice acerca de las leyes físicas de los gases, lo hemos hecho notar ya relativamente á otras leyes naturales. Las de Keplero, por ejemplo, no son verdaderas sino en el caso ideal de que los planetas no ejercieran unos sobre otros las acciones perturbadoras que la observacion y la teoría han revelado de consuno y que á cada momento modifican la forma y dimensiones de sus órbitas y velocidades respectivas. Esta diferencia entre el enunciado rigoroso de dichas leyes y los fenómenos realmente observados, no mengua la importancia del descubrimiento ni el mérito del grande hombre que sepa hacerlo.

III

TERMÓMETRO Y PIRÓMETRO DE AIRE.—EL CERO ABSOLUTO DE TEMPERATURA

Hemos visto ya cuáles son las ventajas y cuáles los inconvenientes del termómetro de mercurio. La comodidad de su empleo y la facilidad de su construccion le hacen precioso para la mayor parte de las observaciones ordinarias; pero adolece del grave defecto de que sus indicaciones no siempre son comparables entre sí, á causa de las desviaciones de los puntos fijos; dos termómetros de mercurio tampoco son siempre comparables, en razon de las variaciones de la dilatacion del vidrio, que no son las mismas de

una envolvente á otra. Ahora bien, la magnitud del coeficiente de dilatacion de un gas comparada con la de los coeficientes de dilatacion de los líquidos y de los sólidos, hace que las influencias de que hablamos no produzcan en los cambios de volúmen de este gas más que errores despreciables.

Y tomando sobre todo, para construir termómetros fundados en la dilatacion de los gases, un gas permanente, por ejemplo, el aire seco, se tiene la seguridad de que su dilatacion permanecerá constante entre los límites de temperatura observables. Por este concepto seria preferible al aire el hidrógeno cuyo coeficiente no varía con la presion si no fuese de uso muy incómodo; pero, segun los experimentos de Regnault, un termómetro de aire y otro de hidrógeno subsisten perfectamente de acuerdo de 0° á 350°.

Todo aparato que sirve para medir la dilatacion de los gases puede emplearse como termómetro de aire. Tales son los que hemos descrito en el artículo anterior y que representan las figuras 45 y 46. En efecto, procediendo en cada operacion del mismo modo que si se tratara de determinar el coeficiente del aire, se deduce una relacion entre este coeficiente, la presion y la temperatura. Esta relacion permite calcular una de dichas cantidades por medio de las otras dos, cuando son conocidas. Se puede pues tomar por incógnita la temperatura, puesto que el coeficiente del aire está calculado para siempre y la presion ó el volúmen del gas se obtienen por el mismo experimento.

De aquí resulta que se pueden emplear dos clases de termómetros de aire segun que se determinen las variaciones del volúmen del gas á presion constante ó las de la presion á volúmen constante. Regnault da la preferencia á este segundo método, porque en el primero la masa de aire sometido á la accion del calor disminuye á medida que sube la temperatura; de donde se sigue que refiriendo su volúmen á la temperatura del tubo en que se observan las dilataciones, este volúmen se calcula con una exactitud decreciente. El aparato basado en la observacion de las variaciones de presion no está sujeto á este inconveniente.

Tambien se puede emplear como termómetro de aire el aparato representado en la fig. 48. El depósito B tiene una forma cilíndrica prolongada, porque es más favorable que la esférica para el pronto establecimiento del equilibrio de temperatura entre el aire interior y el medio cuya temperatura se desea conocer. Supongamos que se trata del vapor de un líquido en ebullicion. Se coloca el depósito en este medio

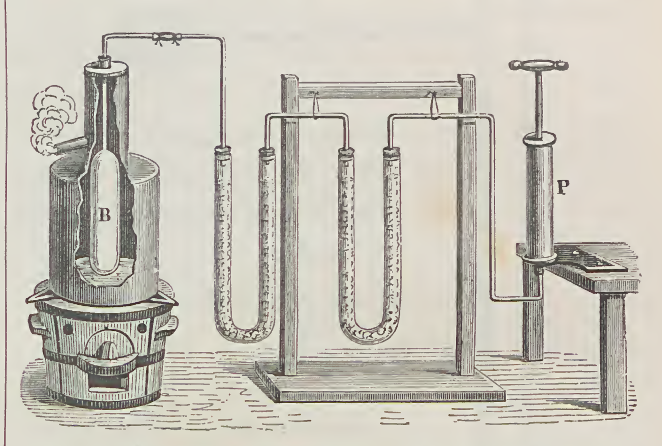


Fig. 48.—Medida de una temperatura con el termómetro de aire

y se le llena de aire seco con los procedimientos y las precauciones que hemos indicado ya. Cuando ha adquirido la temperatura del vapor, se cierra el tubo á la lámpara, observando en este momento la presion del barómetro. Trasládase entónces el depósito á una cubeta de mercurio y se mete el tubo verticalmente en el líquido.

Se rodea de hielo el depósito hasta su extremidad superior, y cuando se le supone á 0°, se rompe la punta del tubo debajo del mercurio. Disminuyendo la presion del aire enfriado del depósito, el mercurio sube por el tubo y á la parte cilíndrica; entónces se mide con el catetómetro la diferencia de nivel del líquido en la cubeta y en el depósito, y la diferencia de esta altura y de la del barómetro da la presion del aire á 0°; deduciéndose ya fácilmente el volúmen actual de este aire del peso del mercurio que ha penetrado en el aparato.

De este modo se tienen todos los elementos que entran en la fórmula, y el cálculo da la temperatura buscada.

La medida de las temperaturas elevadas con el termómetro de aire exige que el depósito que contiene el gas sea infusible á dichas temperaturas. El vidrio pues no puede servir tan luégo como se le pone próximo á la temperatura en que empieza á ablandarse.

Pouillet habia sustituido el platino al vidrio, y su pirómetro de aire, representado en la figu-

ra 49, tenia por principio la medida del volúmen variable del aire dilatado á presion constante. Este físico ha determinado en grados centígrados las temperaturas correspondientes á los distintos colores que toman los gases inalterables cuando se los calienta en una mufla cuyo fuego se ha regulado, ó en una fragua. Véanse los resultados obtenidos:

Colores de los metales incandescentes	Temperaturas correspondientes
Rojo naciente. . .	525°
Rojo oscuro. . .	700°
Cereza naciente. .	800°
Cereza.	900°
Cereza claro. . .	1000°
Anaranjado oscuro.	1100°
Anaranjado claro. .	1200°
Blanco.	1300°
Blanco deslumbrador (la mayor temperatura del fuego de fragua).	1500 á 1600°

Fig. 49. — Pirómetro de aire, de Pouillet

Por desgracia el platino tiene graves defectos que han debido alterar la exactitud de las indicaciones del pirómetro; en primer lugar condensa aire en su superficie, aire que no se desprende sino á partir de 100°; pero este defecto se puede corregir, para lo cual basta no medir el volúmen de aire sino más allá de 100°. Además, á una temperatura elevada el platino es permeable á los gases, y en especial al hidrógeno, de suerte que estando el aparato en un hornillo y sobre una llama que contenga hidrógeno, este gas penetra por endósmosis en el depósito, y combinándose con el oxígeno del aire, forma agua y altera las indicaciones del pirómetro disminuyendo la masa de aire que contiene y que deberia ser constante (1).

Sainte-Claire Deville ha reemplazado el platino con la porcelana de Bayeux, que es impermeable y enteramente rígida á las altas temperaturas que se proponia medir. Y en efecto, los depósitos de dicha sustancia conservaban el vacío absoluto á semejante temperatura, áun distando mucho de hallarse en su punto de fusion ó de ablandamiento. El citado físico ha construido pirómetros en los que introducia, en lugar de aire seco, vapor de iodo, elegido en razon de su gran densidad.

Ya hemos visto que la eleccion del punto fijo del hielo fundente para cero de la escala de las temperaturas ha sido puramente arbitraria, aunque justificada por fundados motivos de comodidad y de conveniencia. Sabemos que este punto no es, en modo alguno, como suelen creerlo algunas personas enteramente extrañas á las más simples nociones de la ciencia, la separacion entre dos estados opuestos de la materia, el calor y el frio. Un cuerpo que está á una temperatura inferior á 0° conserva una cantidad de calor real y positiva, como lo prueban los enfriamientos que puede experimentar y las contracciones de volúmen á ellos correspondientes. Sin embargo hay lugar á dudar de si estas disminuciones de calor pueden continuar indefinidamente, ó si por lo ménos no tienden hácia un límite tal, que si fuese posible llegar á él, la cantidad de calor del cuerpo seria ya nula. En una palabra; se puede plantear la cuestion en estos términos: ¿hay ó no *un cero absoluto de temperatura*? Esta cuestion, abordada de diferentes modos, ha sido resuelta afirmativamente, áun cuando no se haya podido comprobar prácticamente su solucion.

Suponiendo que hay *gases perfectos*, es decir, gases cuyos volúmenes siguen rigurosamente la ley de Mariotte cuando la presion varía, y que se dilatan con uniformidad cualquiera que sea su temperatura, y considerando el aire como uno de ellos, se ha visto que el coeficiente de dilatacion es sensiblemente igual á la fraccion $\frac{1}{273}$ para una variacion de temperatura de

(1) Débese á H. Saint-Claire Deville y Troost la comprobacion de este fenómeno. Despues de reconocer la imposibilidad de construir pirométros de gas con platino cuando se les ha de poner en contacto con los gases reductores ó el hidrógeno de un hornillo, dichos físicos añaden: «La porosidad del platino le impide tal vez conservar los gases á elevada temperatura y á alta presion; pero sobre todo la endósmosis obliga, á pesar de una presion contraria, á los gases del hogar á ponerse en contacto con el aire del pirómetro. Entónces se forma agua, con disminucion de volúmen debida á la aparicion del oxígeno.» Así pues, la masa de gas que deberia ser constante en el pirómetro de platino, varía, y los experimentos prueban que esta disminucion puede ser hasta de 16 por 100.

un grado centígrado. Consideremos un volúmen de aire igual á la unidad á la temperatura del cero centígrado; elevado á otra cualquiera t, dicho volúmen será $1 + \frac{t}{273}$. Calentado, por ejemplo, á + 273°, el volúmen del aire en cuestion será 2, ó duplicará. Pero si se baja la temperatura bajo 0°, á cada grado ménos perderá $\frac{1}{273}$ de su valor, siendo claro que si esta contraccion pudiera continuar hasta — 273°, seria igual al volúmen mismo, y el resultado la anulacion del volúmen. Nada prueba en efecto que el aire pudiera sufrir un enfriamiento tan considerable sin cambiar de estado, sin licuarse y hasta solidificarse (1). Sin embargo, este límite inferior de temperatura es lo que se llama *cero absoluto*.

Obtiénese el mismo resultado por la consideracion de las presiones. Llamando P á la fuerza elástica del aire á la temperatura de cero centígrado, t á cualquier otra temperatura y ocupando el gas el mismo volúmen, la fuerza elástica p ó su presion á volúmen constante la dará la relacion

$$p = P\,(1 + \alpha t) \text{ ó bien } p = P\left(1 + \frac{t}{273}\right).$$

Luego es evidente que si se da á t el valor — 273°, el segundo miembro de la igualdad se reduce á 0. En una palabra, á dicha temperatura de 273 grados centígrados bajo el cero ordinario ó de la fusion del hielo, la presion ó la fuerza elástica del gas seria nula. Pero ya veremos, segun las ideas que prevalecen en la ciencia sobre la constitucion de los gases, que su fuerza elástica, ó, lo que es lo mismo, su fuerza viva molecular, es proporcional á la intensidad del calor y la medida. Por consiguiente, siendo nula esta fuerza viva á — 273°, el calor seria nulo tambien. En una palabra, se habria llegado al *cero absoluto* de temperatura.

Por lo demás, estas sólo son condiciones teóricas. En la realidad física, es probable que el aire y los demás gases que se acercan al estado *gaseoso perfecto*, no tienen á todas las temperaturas las propiedades que se han observado en los límites de nuestros experimentos. Enfriándolos indefinidamente, se acabaria por licuarlos, y quizás por solidificarlos, como hemos dicho, ántes de llegar á — 273° de temperatura. ¿Hay en el universo un punto en que haga un frio tan intenso? ¿hay alguna parte de la materia enteramente privada de calor ó cuyos átomos constitutivos sean inertes? Y en la suposicion de que se realice tal hipótesis, ¿cómo y por qué propiedades, bajo qué forma fenomenal se puede manifestar la materia de que hablamos? Difícil es, segun creemos, formarse una idea de ello.

(1) Pronto veremos que los dos gases que constituyen el aire, el oxígeno y el nitrógeno, han podido licuarse. El enfriamiento necesario no ha excedido de 140 grados bajo cero; pero al mismo tiempo los gases sufrian una compresion de mayor ó menor número de atmósferas.

IV

MEDIDA DE LA DENSIDAD DE LOS GASES

Al describir en su lugar oportuno los varios procedimientos que sirven para determinar las densidades de los cuerpos, sólo hablamos de los sólidos y de los líquidos, sin decir nada acerca de los gases; y es que para comprender los métodos relativos á esta última determinacion, era indispensable conocer las leyes de su dilatacion. Ha llegado el momento en que podamos abordar útilmente esta delicada cuestion.

La densidad de un cuerpo sólido ó líquido no varía sino con la temperatura. Como se ha convenido en tomar por unidad la mayor condensacion del agua (á + 4°) y en calcular la del cuerpo á 0°, y como, por otra parte, se opera generalmente á una temperatura cualquiera, claro está que habrá que corregir los defectos de temperatura de los resultados obtenidos. Para esto hay tablas en que al lado de las cifras que representan la dilatacion del agua de grado en grado, están inscritas las densidades correspondientes del mismo líquido. Los procedimientos que hemos descrito, por ejemplo el de la balanza hidrostática, dan la densidad del cuerpo á la temperatura del experimento. Para conocer la densidad á 0°, bastará recordar que las densidades á dos temperaturas diferentes están en razon inversa de los volúmenes.

Mas, con respecto á los gases, la cuestion de las densidades se complica con un nuevo elemento, que es el de la presion. Por otra parte, la densidad de un gas no se refiere ya á la del agua, de la cual no es más que una fraccion sobrado mínima; el aire es el que sirve de término de comparacion y el que se emplea en los experimentos. Lo que se llama *densidad* de un

gas no es otra cosa sino la relacion entre el peso de un volúmen determinado de este gas y el de un volúmen igual de aire seco, tomado uno y otro á 0° y á la presion normal de 760 milímetros.

Parece, segun esta definicion, que bastaria hacer dos pesadas, una del aire en un globo de vidrio por ejemplo, y otra del gas en el mismo globo. Este método, empleado por Biot y Arago, requiere muchas precauciones para evitar las causas de error. Hay que pesar ante todo con cuidado el globo vacío, que debe estar enteramente exento de todo vestigio de aire ó de humedad; en seguida introducir en él sucesivamente aire seco, luégo el gas cuya densidad se quiere averiguar, midiendo con la mayor exactitud posible la temperatura del gas y su presion; y por último, tomar nota de la presion atmosférica por cada una de las pesadas sucesivas, puesto que estas se hacen al aire libre y se las debe corregir del peso del aire desalojado (principio de Arquímedes). Este método, muy sencillo en teoría, es harto complicado en realidad. Regnault ha discurrido otro, que consiste en eliminar las principales causas de error.

Con tal objeto, escogió dos globos de la misma clase de vidrio, de unos 10 litros de capacidad cada uno, y provistos de armaduras con sus llaves. Los llenó de agua y los suspendió del platillo de una fuerte balanza hidrostática, equilibrándolos. Metidos ambos, en tal estado, en una cubeta de agua, experimentaron empujes desiguales á causa de no ser idéntico su volúmen. Rompióse el equilibrio durante la inmersion, y para restablecerlo fué preciso añadir cierto peso en el lado del mayor. Haciendo un tubo de vidrio que pesara precisamente esta diferencia, y enganchándolo al globo más pequeño obtuvo dos recipientes tan iguales como le fué posible en su volúmen exterior, y que por lo tanto debian experimentar los mismos empujes, miéntras durasen los experimentos, cualesquiera que fuesen la presion barométrica, el estado higrométrico y la temperatura del aire. Preparados así los dos globos, los colgó de los dos platillos de una balanza, cerrados y equilibrados. Es evidente que tomando uno de ellos para hacer el vacío é introduciendo sucesivamente en él aire ó algun gas, la disminucion ó el aumento de peso que resultaban procedian únicamente del gas extraido ó del introducido, y que ya no era menester tener en cuenta las pérdidas de peso de los globos al aire por cuanto eran iguales. Para evitar las correcciones relativas á la temperatura del gas interior, Regnault hizo de modo que el gas y el aire introducido se pesasen á la temperatura del hielo fundente. Empezaba por hacer muchas veces el vacío en el globo que servia de recipiente, haciendo pasar siempre el gas por tubos de desecacion. El manómetro de la máquina neumática marcaba la presion interior del gas que quedaba cuando habia hecho el vacío. Durante esta operacion, el globo estaba colocado en una vasija de zinc llena de hielo; luégo se le secaba y se le colocaba en un platillo de la balanza; el otro platillo sustentaba el segundo globo, y se establecia el equilibrio con perdigones. Llevando entónces de nuevo el globo al hielo y abriendo la llave, se dejaba penetrar el gas hasta que su presion total fuese igual á la de la atmósfera. Cerrando la llave y pesando el globo, se tenia el peso de un volúmen de gas á 0°, volúmen igual á la capacidad del globo á esta misma temperatura.

Por último, una tercera operacion análoga daba el peso de un volúmen semejante de aire seco á 0° y tambien á una presion total que se media con un manómetro de aire libre, el cual comunicaba con el globo.

Hé aquí las densidades de algunos gases obtenidas con estos procedimientos.

Gases	Densidades	Peso del litro en gramos	Observadores
Aire..	1,0000	1,2932	»
Oxígeno.. . .	1,1056	1,4298	Regnault
Nitrógeno.. .	0,9714	1,2561	Regnault
Hidrógeno. .	0,0693	0,08958	Regnault
Acido carbónico. . . .	1,5290	1,9774	Regnault
Amoniaco.. .	0,5967	0,7616	Biot y Arago
Acido sulfhídrico. . . .	1,1912	1,5404	Gay-Lussac y Thenard
Acido clorhídrico. . . .	1,2472	1,5891	Biot y Arago
Cloro.	2,4700 (1)	3,1937	Gay-Lussac y Thenard
Acido sulfuroso. . . .	2,2474	2,8060	Gay-Lussac
Cianógeno. .	1,8064	2,3302	Gay-Lussac
Protóxido de ázoe. . . .	1,5270	1,9710	Thomson

Las cifras de la tercera columna están deducidas del peso del litro de aire atmosférico, ha-

(1) A la temperatura ordinaria.

llado por Regnault, á la temperatura del hielo fundente y á la presion de 760 milímetros. Este peso es igual á 1gr,293187, es decir, á la 773.ª parte del del agua destilada. Biot y Arago habian hallado 1gr,299, valor un poco mayor. Como la intensidad de la gravedad varia segun la altitud y la latitud del lugar, la presion de 760 milímetros tiene asimismo un valor variable.

Terminemos este artículo recordando que entre el procedimiento adoptado por Biot y Arago, y el que Regnault ha discurrido con tanto acierto, Dumas y Boussingault habian adoptado tambien en 1860 un método muy exacto para obtener las densidades de los gases evitando las causas de error que hemos indicado. Dichos físicos hallaron tambien como densidad del oxígeno 1,1057, del nitrógeno 0,972 y del hidrógeno 0,0693, cifras que son casi idénticamente las mismas que dió cinco años despues el método perfeccionado de Regnault.

CAPITULO VI

CAMBIOS DE ESTADO DE LOS CUERPOS.—FUSION Y SOLIDIFICACION

I

LOS TRES ESTADOS.—¿PUEDEN TOMAR TODOS LOS CUERPOS EL ESTADO SÓLIDO, EL LIQUIDO Y EL GASEOSO?

La accion del calor, tal como la hemos estudiado hasta aquí, se ha empleado enteramente al parecer en aumentar el volúmen de los cuerpos que la experimentan, es decir, en separar sus moléculas constitutivas. Estas moléculas, retenidas en los sólidos por la cohesion á distancias determinadas y en posiciones relativas fijas para un grado de temperatura, se desvian más y más á medida que la accion repulsiva del calor aumenta, hasta el momento en que esta fuerza prepondera y queda anulada la cohesion. En este momento el cuerpo adquiere otro aspecto, y de sólido se convierte en líquido. Si entónces continúa subiendo la temperatura, es más marcada la tendencia de las moléculas á desviarse unas de otras, hasta que se efectúa una nueva trasformacion y el cuerpo pasa del estado líquido á otro estado, el de gas ó vapor. Entónces ha desaparecido toda cohesion entre las moléculas del cuerpo, que, en vez de conservar sus posiciones y distancias respectivas como en el estado sólido, ó de permanecer en equilibrio indiferente como en el líquido, se repelen y tienden á la expansibilidad indefinida si no se opone á ello una presion suficiente (1). Ocurren los mismos fenómenos, aunque en sentido inverso, si, tomando primeramente un cuerpo gaseoso, como vapor de agua, se disminuye progresivamente su temperatura y se ve que dicho vapor se vuelve líquido y pasa luégo al estado sólido.

Así pues, los cambios de volúmen y los de estado ocasionados por las variaciones de temperatura forman una serie continua de fenómenos que obedecen á la misma causa. Ya hemos descrito los primeros y estudiado sus leyes: ha llegado el momento de estudiar los segundos.

¿Todos los cuerpos son susceptibles de tomar los tres estados?

Unicamente la experiencia podia contestar á esta pregunta. Limitándose á la observacion inmediata, es por lo pronto fácil de comprobar que, á las temperaturas comunes, es decir, entre los extremos de frio y de calor que pueda haber en cada clima, tan sólo algunos cuerpos pueden presentarse bajo estos diferentes aspectos; por

(1) «Si se calienta más y más un cuerpo sólido, dice Lavoisier, si se continúa introduciendo ó acumulando en él nuevas cantidades de calórico, sus moléculas se desvian cada vez más unas de otras hasta que se llega á un límite en que estas moléculas dejan de estar en la esfera de actividad de su atraccion: entónces es cuando el cuerpo pasa del estado sólido al líquido, en el cual no tan sólo dichas moléculas no tienen ya más adherencia entre sí, no tan sólo no ejercen ya atraccion alguna una sobre otra, sino que propenden á obedecer á una fuerza repulsiva que les imprime sin duda el calórico; esfuérzanse por separarse, y se separarian indefinidamente en el espacio, si la gravedad de la atmósfera no lo impidiese.» *(Del paso de los cuerpos sólidos al estado líquido por la accion del calórico,* OBRAS COMPLETAS de Lavoisier.) Desde que se escribió este párrafo, se han modificado profundamente las ideas de los físicos sobre la accion del calor, pero se sigue concibiendo del mismo modo su accion sobre las moléculas de los cuerpos.

ejemplo, el agua es sólida en invierno durante los grandes frios, líquida á las temperaturas medias, y se evapora fácilmente cuando se la somete á la accion de un foco calorífico. Algunos sólidos, como los llamados *cuerpos grasos*, se licuan á una temperatura poco elevada: la manteca, el sebo, la estearina se hallan en este caso. Muchos líquidos despiden vapores á las temperaturas ordinarias, ó pasan, en parte al ménos, al estado gaseoso; casi todos se evaporan completamente si se los somete á un grado de calor conveniente, que es distinto para cada uno de ellos.

La mayoría de los cuerpos sólidos necesitan una temperatura muy elevada para fundirse. Tales son los metales. Pero entre unos y otros media gran diferencia; pues al paso que el estaño, el bismuto y el plomo se licuan á una temperatura menor que la de la ebullicion del mercurio ó muy poco superior, el oro, el hierro y el platino no entran en fusion sino á muchísimos grados de calor. Si consideramos el extremo opuesto de esta escala, vemos que el mercurio no se solidifica sino á las más bajas temperaturas de las regiones boreales ó por efecto de los frios artificiales producidos por ciertas mezclas. Algunos metales reducidos al estado líquido despiden vapores y por consiguiente adquieren el estado gaseoso. Pero hasta hace muy poco tiempo no se ha podido volatilizar muchos de ellos, como el oro, la plata y el cobre, resultado que se ha obtenido con el calor desarrollado por el arco voltaico. Merced al empleo de estos intensos focos artificiales se han derretido los minerales y hasta las rocas más duras, no habiendo hoy apénas cuerpos que puedan llamarse *refractarios* ó *fijos*, entendiendo por esto, como en otro tiempo, los sólidos capaces de resistir las temperaturas más altas sin licuarse ó descomponerse. Aun entre estos últimos hay algunos que se ha conseguido licuar, ejerciendo sobre ellos una presion que impide el desprendimiento de aquellos de sus principios constitutivos que por la accion se tornan gaseosos ántes de la fusion. La creta, por ejemplo, que es un carbonato de cal como el mármol, se descompone si se la somete á la accion de un fuerte calor; el ácido carbónico se separa de la cal en forma gaseosa, y la cal misma es uno de los escasos sólidos que hasta el presente han resistido á la fusion y á los cuales se puede calificar de refractarios como la magnesia y la estronciana. Pero, gracias á un procedimiento ideado por Hall en 1804 se ha podido fundir la creta, así como otros cuerpos, como la hulla. Este físico llenaba de creta un tubo de hierro muy resistente, y lo cerraba herméticamente ántes de someterlo á la accion de un calor intenso. La alta presion que se desarrollaba en el interior del tubo y que procedia del gas resultante de un principio de descomposicion, impedia la continuacion de dicha accion, y el carbonato de cal se fundia. Dejando que el tubo se enfriase poco á poco, Hall encontraba en el interior un cilindro sólido de estructura cristalina, enteramente parecido al mármol sacaroideo.

Sin embargo, la mayor parte de los sólidos de orígen orgánico, como la madera y las demás sustancias vegetales ó animales, se descomponen en sus elementos por efecto del calor sin licuarse. Uno de estos elementos, el carbono, es una de las sustancias más refractarias; con todo, ya veremos que ha dado indicios de fusion. En cuanto á los demás elementos, son por lo general sustancias volátiles, gases, y hoy sabemos que se ha podido reducir todos los gases al estado líquido, mediando ciertas condiciones de temperatura y de presion. Hoy ya no existen *gases permanentes*, como podia decirse hace pocos años.

Todo hace, pues, presumir que no hay en la naturaleza ninguna sustancia que no pueda adquirir sucesivamente los estados sólido, líquido y gaseoso, en condiciones á propósito de temperatura y de presion. Al estudiar estas trasformaciones, veremos que es el calor el que desempeña siempre el papel principal.

II

FUSION DE LOS CUERPOS SÓLIDOS. — FUSION BRUSCA Y FUSION VÍTREA. — LEYES DE LA FUSION

Se pueden clasificar en dos categorías principales los sólidos que pasan al estado líquido por efecto del calor. Unos, como el vidrio, las resinas, la cera y la mayor parte de los cuerpos grasos, experimentan á medida que aumenta la temperatura un reblandecimiento gradual que les da al principio una consistencia pastosa: á esta clase de fusion se la da el nombre de *vítrea*,

porque es más característica en el vidrio que en cualquier otro cuerpo. Otros sólidos, como el hielo y los cuerpos metálicos, pasan bruscamente al estado líquido. De esta distincion resulta que la observacion de la temperatura á que se produce la fusion vítrea es incierta; miéntras dura el reblandecimiento, esta temperatura continúa subiendo, y hasta que la liquidez ha alcanzado su máximum, no se puede anotar el punto á que ha llegado. Sin embargo, es probable que á cada grado de consistencia de la materia que se experimenta corresponda tambien un grado fijo de temperatura. No sucede así respecto de los sólidos de fusion brusca. Entónces caracterizan al fenómeno dos leyes precisas, de las que ya hemos dicho algo al hablar de la fusion del hielo. Dichas leyes pueden enunciarse así: cada sustancia se funde á una *temperatura invariable* que se reproduce idénticamente en todos los experimentos; esta temperatura *es fija miéntras dura la fusion*, cualquiera que sea la intensidad del calor empleado en la operacion. Aumentando este puede acelerarse la rapidez de la fusion; pero miéntras subsista una partícula sólida, la temperatura no pasa del punto fijo; el termómetro sumergido en el baño líquido permanece estacionario.

Veremos asimismo que, para fundir un peso dado de cualquier sustancia, la cantidad de calor absorbido es siempre la misma, ó lo que es igual, que el calor invertido en la fusion de una masa determinada de un cuerpo es proporcional á esta masa; por lo demás, varía de una sustancia á otra. Pero como este calor no sirve para elevar la temperatura, puesto que el trabajo de la fusion lo absorbe por completo y por consiguiente no se manifiesta exteriormente, se le ha dado el nombre de *calor latente de licuacion* ó *de fusion*, por oposicion al calor que influye en el termómetro. Más adelante veremos el sentido que se ha de dar á esta expresion, cuando tratemos del trabajo mecánico del calor.

Las sencillísimas leyes que acabamos de enunciar no tuvieron exacta comprobacion hasta la segunda mitad del siglo pasado. A la sazon se creia todavía que el punto de fusion era variable, que el hielo por ejemplo se derrite á diferentes temperaturas, segun la altitud ó segun la latitud del lugar del experimento. El físico escocés Black fué quien descubrió en 1762 la constancia de la temperatura durante la fusion y sobre todo la distincion entre el calor latente, que procuró medir, y el calor sensible.

Se puede medir de dos modos la temperatura de fusion de un sólido: observándola directamente cuando el cuerpo está sometido á la accion del calor, ó fundiendo primeramente este cuerpo, y esperando luégo el momento en que se efectúa la solidificacion. Véase, segun Buignet, cómo se procede para la medicion directa: «Se coge un tubito de gas y se le adelgaza por un extremo cerrando su punta. Por otra parte, se toma un termómetro muy sensible que marque décimas de grado, y se meten ambas piezas en un tapon que se adapta al gollete de una gran redoma llena de agua. Caliéntase esta con una luz de gas, y se eleva la temperatura lenta é insensiblemente. Tomadas estas disposiciones, se introduce en el tubo una corta cantidad de la materia sólida cuyo punto de fusion se desea averiguar, y que cae en la parte inferior, pero sin penetrar en la parte cónica adelgazada. Elevada primeramente el agua de la redoma á una temperatura algunos grados inferior al punto calculado de fusion, y sumergidos el tubo y el termómetro en esta especie de baño de María, se eleva muy poco á poco la temperatura observando con cuidado la parte cónica del tubo. Tan luégo como la sustancia empieza á fundirse, se echa al punto de ver por el aspecto particular que toma al extenderse por la pared curva del vidrio. Entónces se anota el grado marcado por el termómetro, el cual indica el punto de fusion de la materia sometida al experimento.»

El cuadro siguiente da los puntos de fusion de cierto número de cuerpos sólidos, simples ó compuestos, clasificados por el órden de temperaturas decrecientes de estos puntos:

TEMPERATURAS DE FUSION Ó DE SOLIDIFICACION DE VARIAS SUSTANCIAS

Nombres de las sustancias	Temperaturas de fusion
Iridio. . . . . sobre	1950°
Platino.	1700
Paladio.	1700
Hierro forjado inglés.	1600
Hierro dulce francés.	1500
Acero, el ménos fusible.	1400
Acero, el más fusible.	1300
Oro.	1250

Nombres de las sustancias	Temperaturas de fusion
Palastro gris..	1100 á 1200°
Palastro blanco..	1030 á 1100
Oro á la ley de la moneda.	1080
Cobre..	1050
Cobre amarillo..	1015
Plata.	1000
Bronce.	900
Aluminio.	600
Teluro.	525
Cadmio.	500
Zinc.	450
Ioduro de plata.	450
Antimonio.	440
Bromuro de plata.	380
Cloruro de plata.	350
Plomo.	335
Clorato de potasa.	334
Succino.	288
Bismuto.	265
Cloruro de zinc.	250
Estaño.	235
Selenio.	217
Arsénico..	210
Nitrato de plata.	198
Alcanfor de Borneo.	195
Alcanfor del Japon.	175
Azúcar de caña.	160
Colofonia.	135
Azufre.	115
Iodo.	107
Azúcar de uva.	100
Ambar gris.	100
Aleacion Darcet (5 plomo, 3 estaño, 8 bismuto).	94
Sodio.	90
Naftalina..	78
Cera amarilla.	76
Cera blanca..	69
Estearina..	61
Esperma..	49
Potasio.	55
Fósforo.	44
Parafina.	44
Sebo.	33
Manteca.	30
Agua.	0
Bromo.	— 7,5
Varios éteres. . . . . . bajo.	— 32
Mercurio..	— 39,5
Amoniaco anhidro.	— 80
Alcohol absoluto. . . . . bajo.	— 90
Varias aleaciones	
— 3 equiv. plomo 1 estaño..	289
— 1 — — 1 —	241
— 1 — — 2 —	196
— 1 — — 3 —	186
— 1 — — 4 —	189
— 1 — — 5 —	194
— 2 — — 9 — 1 zinc.	168

Vese cuán diferentes son las temperaturas necesarias para fundir las sustancias contenidas en el cuadro anterior, áun cuando pertenezcan, como el platino y el mercurio, á la misma familia de cuerpos simples, á la de los metales, no siendo menor de 1800° la diferencia entre dichos dos cuerpos; el bromo se vuelve líquido á 7°,5 bajo cero, al paso que el iodo necesita una temperatura superior á la del agua hirviendo. Se observará que ciertos compuestos, como el bromuro ó el ioduro de plata, tienen un punto de fusion intermedio entre los de los cuerpos simples que los constituyen (lo cual no se explica muy fácilmente), miéntras que muchas aleaciones de plomo y estaño, ó de plomo, estaño y bismuto, se funden á temperaturas inferiores á las de los metales de que están formadas; propiedad merced á la cual se pueden obtener aleaciones fusibles, como la conocida de Darcet, cuyo punto de fusion es tan sólo de 94°. Heintz ha demostrado tambien que una mezcla de ácidos grasos se derrite á una temperatura mucho más baja que las de los mismos ácidos. Por ejemplo, los ácidos mirístico, palmítico y láurico se funden, el primero á 53°,8, el segundo á 62° y el tercero á 43°,6, al paso que una mezcla de tres partes de ácido mirístico, 7 de ácido palmítico y 2 de ácido láurico tiene su punto de fusion á 32°,7.

Por lo que respecta á los cuerpos que, para pasar al estado líquido, empiezan por ablandarse, adquieren consistencia pastosa y llegan insensiblemente á la fusion completa, se comprenderá que es difícil asignar con alguna precision la temperatura á que se obtiene ésta. Especialmente para algunos de ellos, como el vidrio, cuya composicion es bastante compleja, la fusibilidad es una propiedad que varía con esta composicion, es decir, con la naturaleza de los cuerpos que entran en ella á la vez que con su proporcion. Los vidrios incoloros que sirven para fabricar vajilla, los cristales de edificios, las lunas de espejos son silicatos dobles de cal y de potasa ó de sosa; el vidrio de botellas contiene óxido de hierro y peróxido de manganeso; los cristales destinados á la óptica que llevan los nombres de crown-glass ó flint-glass segun su composicion, contienen además carbonato de potasa, ácido arsenioso, minio, etc. Pues bien, de todos estos cuerpos, unos, como los silicatos

de potasa y de sosa, son muy fusibles; otros, como los silicatos de cal, necesitan para fundirse una temperatura elevada, la de los más fuertes fuegos de fragua, ó tan sólo se ablandan; los silicatos de hierro, de manganeso y de plomo son mucho más fusibles y ceden á las temperaturas de los hornillos de laboratorio. Vese pues en todo esto lo que acabamos de consignar acerca de la temperatura de fusion de las aleaciones, á saber: que los silicatos múltiples se funden por lo comun á una temperatura inferior á la de los silicatos constitutivos, circunstancia afortunada para la industria de la vidriería y para las numerosas operaciones que ha de efectuar en atencion á los variados usos de sus productos.

III

SOLIDIFICACION DE LOS CUERPOS LIQUIDOS.—CONGELACION

La *solidificacion* de los líquidos es el fenómeno contrario al de la fusion de los sólidos, pero obedece á las mismas leyes. La temperatura á la cual ocurre este cambio de estado es fija para cada cuerpo y precisamente la del punto de fusion. Por ejemplo, cuando una masa de hielo está á la temperatura de cero, cualquiera adicion de calor produce la fusion de una parte de esta masa, así como cuando se trata de una masa de agua á la misma temperatura de cero, cualquier sustraccion de calor ocasiona la congelacion ó solidificacion de una parte del líquido. Si se trata de sustancias que no pasan bruscamente al estado líquido, que empiezan por tomar una consistencia pastosa cuando se las calienta gradualmente, presentan los fenómenos inversos al pasar del estado líquido al sólido, espesándose poco á poco á medida que se enfrian y no llegando á su solidificacion completa sino en el punto en que habian empezado á ablandarse.

La segunda ley que, segun hemos visto, preside á la fusion es tambien verdadera por lo que atañe á la solidificacion de los líquidos. Miéntras toda la masa del cuerpo en vías de solidificarse no ha sufrido el cambio de estado, su temperatura subsiste invariable, por intensa que sea la causa de enfriamiento á que el cuerpo está sometido. Todo el calor que habia sido absorbido durante el paso del cuerpo al estado líquido, y al cual hemos dado el nombre de *calor latente de liquidez*, cobra su libertad durante el tránsito contrario y sirve para mantener fija la temperatura de la masa aún no solidificada.

Todavía no ha sido posible congelar algunos líquidos, por ejemplo, el alcohol absoluto, conforme se desprende del cuadro anterior, en el cual se ve que la temperatura de fusion de este cuerpo es inferior á —90°. Sin embargo, sometiendo Despretz el alcohol al frio de una mezcla frigorífica de ácido carbónico sólido, éter y protóxido de ázoe líquido, lo ha reducido á una consistencia pastosa bastante marcada para que se pudiera volcar el vaso sin que se derramase (1). Tambien pudo Braun, en 1759, congelar el mercurio con una mezcla frigorífica, cosa que no se habia podido conseguir hasta entónces. Estos experimentos se repitieron en 1795 en la Escuela politécnica, con cuyo objeto se valió Thilorier de una mezcla de acido carbónico sólido y éter. La congelacion del mercurio por efecto únicamente de los frios atmosféricos se observó por primera vez durante la expedicion de Parry á las regiones boreales. Al solidificarse este cuerpo cristaliza en octaedros; adquiere la maleabilidad y tenacidad del plomo, de suerte que se le ha podido aplanar á martillazos y acuñar medallas con el troquel.

IV

CAMBIOS DE VOLÚMEN OCASIONADOS POR LA FUSION Ó LA SOLIDIFICACION.—FUERZA EXPANSIVA DEL HIELO

La fusion de los cuerpos sólidos y el fenómeno inverso de la solidificacion de los líquidos se caracterizan por las dos mismas leyes de la fijeza del punto á que se efectúan los dos cambios de estado, ó de la invariabilidad de la temperatura miéntras dura uno ú otro fenómeno. Pero si la temperatura de la fusion y la de la solidificacion son idénticas y subsisten fijas é invariables para una misma sustancia, no suceda lo propio con respecto al volúmen, que sufre un brusco cambio en este tránsito de un estado físico á otro. Por lo general, lo que resulta de la fusion de un cuerpo sólido es una dilatacion, de suerte que el líquido que procede de aquélla tiene ménos densidad que éste. Con todo, de

(1) M. Wrobleski acaba de solidificar el alcohol en abril de 1883.

esta regla se exceptúa un corto número de cuerpos sólidos; tales son: el hierro, el palastro, el bismuto, la plata, el antimonio, el ácido sulfúrico bihidratado, y la aleacion compuesta de 1 parte de estaño, 1 de plomo y 4 de bismuto. Todos estos cuerpos se contraen al licuarse, y son más densos en estado líquido que en el sólido. A esta propiedad se debe la perfeccion del moldeo del hierro colado; cuando se le hace pasar líquido por los moldes huecos de los objetos que se han de reproducir, se dilata al enfriarse y solidificarse, y la presion que resulta de esta dilatacion contra las paredes de los moldes obliga al metal á adquirir con toda fidelidad la forma de estos en sus menores detalles.

La dilatacion del agua que se congela es un hecho de observacion del que cualquiera puede cerciorarse, pues durante el invierno se ven flotar los témpanos en el agua de los rios y lagos. Todos los años, al volver la primavera, vienen á derretirse en las aguas más cálidas de las latitudes ménos elevadas, muchas masas de hielo procedentes de los grandes bancos y de los glaciares de las regiones polares; verdad es que el agua del mar es más densa que la pura de la que se han formado los icebergs por congelacion. Galileo habia hecho ya observar que el hielo era ménos denso que el agua sobre la cual flota, y los académicos de Florencia habian comprobado mediante un experimento clásico el hecho de la dilatacion del agua que se congela, pues habiendo llenado de agua una esfera de cobre que sometieron á un frio intenso, esta se rompió, á pesar de que el metal tenia ocho líneas de espesor. En 1667, Huygens hizo que estallase por dos puntos un tubo de hierro de un dedo de grueso lleno de agua y herméticamente cerrado: la rotura ocurrió á las doce horas de tener expuesto el tubo á una helada. Véase cómo repetia Pouillet en su cátedra este experimento de Huygens: «Para ello, dice, me valgo de tubos de hierro muy gruesos, de un metro de largo por tres centímetos de diámetro interior, cerrados á tornillo por ambos extremos. Despues de llenarlos de agua, los meto en una caja de madera poco honda, y los cubro con una mezcla frigorífica de sal y hielo machacado, y en breve estallan con estruendo y se abren en toda su longitud esos tubos capaces de resistir la presion de muchos centenares de atmósferas. Del mismo modo se pueden hacer salir de ellos cilindros de hielo y demostrar que el agua sólo se ha congelado en parte para producir una explosion tan fuerte.»

Conocidos son tambien los célebres experimentos que el mayor de artillería Eduardo Williams hizo en Quebec en 1784 y en enero de 1785. Habiendo llenado de agua unas bombas de 13 pulgadas de diámetro, las expuso á la baja temperatura del aire libre. Un tapon de hierro fuertemente metido á modo de espoleta en estas bombas fué á parar á larga distancia en siete experimentos consecutivos; é inmediatamente despues de la explosion y cada vez que saltaba el tapon, salia de la bomba un cilindro de hielo de muchas pulgadas de longitud. Como la temperatura exterior hubiese descendido á 24 grados bajo cero al hacer el octavo experimento, la bomba estalló, se rajó y entre los dos fragmentos salió una placa de hielo en forma de aleta de pescado.

Ch. Martins y Chancel reprodujeron en 1870 los experimentos del mayor Williams, y calcularon la fuerza que hacia estallar los proyectiles. Operaron primero con una bomba de 22 centímetros de diámetro exterior y de 26 milímetros de grueso, y despues de llenarla de agua á $+ 4^o$, la cerraron con un tornillo y una rodaja de plomo interpuesta entre la curvatura de la bomba y el reborde del tornillo. Hecho esto, la metieron en una mezcla frigorífica á $- 21^o$. «Al cabo de hora y media, dice, el proyectil se hendió, siguiendo la raja un círculo máximo que pasaba por el orificio, y se separó en dos fragmentos. La capa de hielo era regular y de 10 milímetros de espesor; el volúmen del hielo llegaba á 814 centímetros cúbicos, pero este volúmen corresponde á otro de agua menor de $\frac{1}{11}$ ó de 74 centímetros cúbicos, y como el agua se comprime 50 millonésimas por atmósfera, resulta que la fuerza que ha hecho estallar la bomba equivalia á 550 atmósferas, suponiendo el hielo compresible como el agua.»

Otros experimentos hechos con proyectiles huecos más pequeños que las bombas han dado á los mismos observadores presiones de 440 y 574 atmósferas. Valiéndose de una disposicion muy ingeniosa pudieron tambien colocar en el centro de las bombas un depósito de termóme-

tro cuyo tubo graduado podia observarse de léjos con anteojos y cerciorarse así de que la primera vez el agua interior habia bajado de 10°,7 á — 2°,8 y la segunda de 8°,4 á — 4°,2; lo cual es una comprobacion del hecho de que la presion hace bajar el punto de congelacion del agua. Pronto volveremos á ocuparnos de este último fenómeno.

Del mismo modo se podria comprobar la fuerza expansiva de los demás líquidos que se dilatan al solidificarse. Tyndall ha hecho un experimento análogo con el bismuto. «Estais viendo, decia en una de sus lecciones sobre el Calor, estais viendo esta botella de hierro rajada desde el gollete hasta el fondo; la rompo con este martillo y se os aparece ocupada interiormente por un núcleo metálico. Este metal es bismuto: lo he echado en la botella cuando estaba derretido y la he tapado con un tornillo. El metal se ha enfriado, se ha solidificado y dilatado, y la fuerza de expansion ha sido bastante para rajar la botella.»

Cualquiera ha podido ser testigo de casos que prueban la intensidad de la fuerza expansiva del hielo que rompe las vasijas llenas de agua, y las cañerías de plomo ó de hierro de las casas cuando se comete la imprudencia de echar agua por ellas miéntras hay una fuerte helada. En invierno, cuando el suelo henchido de humedad se hiela brusca é intensamente, la dilatacion que de esto resulta causa bastantes perjuicios: los empedrados se aflojan y levantan, y las paredes se cuartean; las piedras que retienen el agua que se solidifica durante los grandes frios, se disgregan y se hienden; por último, congelándose la savia en los inviernos muy rigurosos, ocasiona grietas y hendiduras en los árboles.

En los primeros capítulos hemos visto que, á excepcion de un cuerpo, el ioduro de plata (que se contrae cuando su temperatura aumenta, y esto á un punto distante de su fusion), todos los demás cuerpos sólidos ó líquidos se dilatan por efecto del calor; sólo que la dilatacion del cuerpo en su forma líquida sigue las más veces una ley distinta de la que observa en la forma sólida. Por último, acabamos de ver que en el tránsito de un estado á otro, ciertas sustancias, como el agua y el bismuto, sufren una contraccion más ó ménos brusca; por el contrario, los demás experimentan una dilatacion. Pero en todos ellos la proximidad al punto de fusion ó de solidificacion es asiento de una perturbacion que probablemente depende de la nueva distribucion de las moléculas que forzosamente ocasiona el cambio de estado. El físico aleman Ermann ha estudiado en tres cuerpos las variaciones de volúmen á uno y otro lado del punto de fusion, pudiendo comprenderse fácilmente por medio de un trazado cómo se conducen dichos cuerpos, que son: el agua, el fósforo y la aleacion fusible cuyas proporciones hemos dado en la página 68. Contando las temperaturas en el eje XX′ y figurando el volúmen del cuerpo con una ordenada ó recta perpendicular al eje, las variaciones de

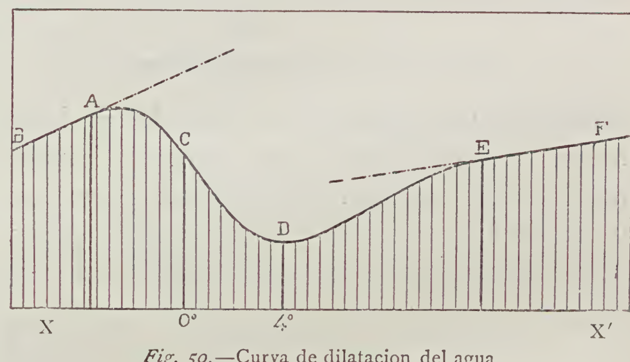


Fig. 50.—Curva de dilatacion del agua

volúmen resultan representadas por una curva que se obtiene reuniendo con una línea continua los extremos de todas las ordenadas: miéntras esta curva se aparta del eje hay dilatacion; por el contrario, si se acerca, hay contraccion. Las figuras 50, 51 y 52 presentan tres ejemplos de la ley de variacion en la proximidad de los puntos de fusion en el agua, el fósforo y la aleacion susodicha; nos muestran que un poco ántes de la inmediacion al referido punto, la dilatacion está representada por una línea oblicua al eje, y que sucede lo propio con la dilatacion del cuerpo á cierta distancia del punto crítico. Mas por lo que respecta al agua, la inclinacion de la segunda línea EF es menor que la de la primera AB, viniendo á ser la confirmacion del conocido hecho de que el coeficiente de dilatacion del hielo es mayor que el del agua. Lo contrario sucede con el fósforo; y con respecto á la aleacion fusible, las dos líneas son la prolongacion una de otra, viéndose por tanto que la dilatacion de la aleacion líquida es la misma que la de la sólida.

En cuanto á lo que ocurre á la proximidad del punto de fusion, examinando las curvas podemos formarnos una idea muy clara de ello. El hielo tomado bajo 0°, empieza por dilatarse cuando se le calienta; un poco ántes de llegar al punto de fusion, se contrae, y esta contraccion continúa cuando el agua se ha hecho líquida hasta á +4° que es el máximum de densidad; luégo, á partir de este punto, empieza de nuevo la dilatacion, creciendo rápidamente al principio y acabando por adquirir una marcha regular, pero ménos rápida que la del hielo á aumentos de temperatura iguales. Por lo que hace al fósforo, dos líneas rectas BA y EF figuran su dilatacion en estado sólido y en el líquido. No se ha podido determinar su marcha hácia el punto de fusion. Finalmente, respecto de la aleacion fusible, vese que una curva análoga á la del agua enlaza las dos líneas rectas entre las temperaturas de 43°,7 y 100°; desde el primer número de grados hasta los 60°,7 hay contraccion rápida; el volúmen se dilata desde este punto hasta los 94°, temperatura de la fusion, y en seguida hasta los 100°, recobrando entónces la dilatacion el mismo valor que en el estado sólido.

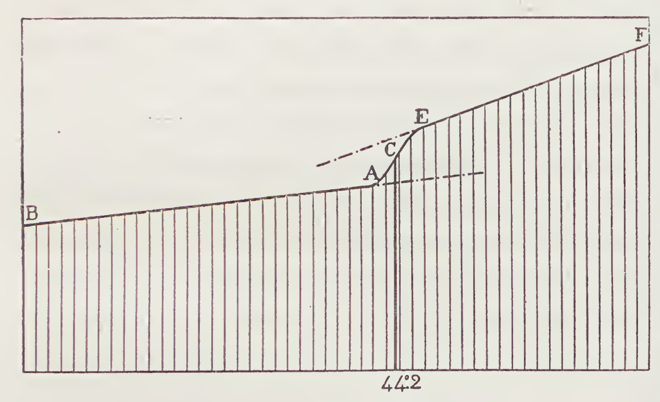


Fig. 51.—Curva de dilatacion del fósforo

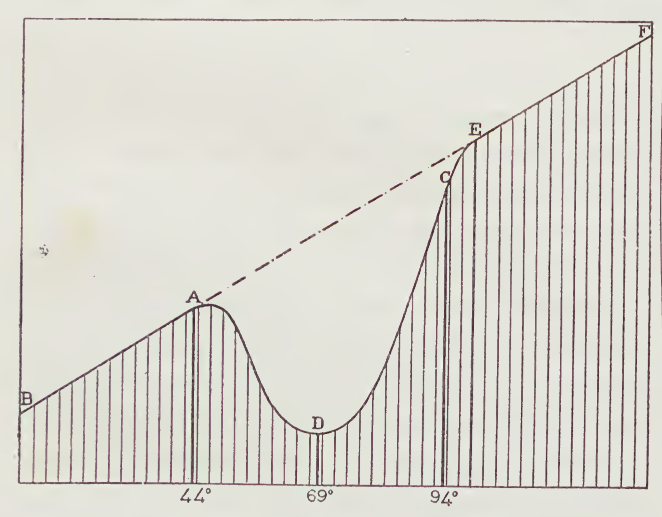


Fig. 52.—Curva de dilatacion de la aleacion fusible Ermann

Las causas de estas singulares variaciones son desconocidas, mas por lo general se las atribuye á los cambios de estructura molecular que preceden y acompañan al cambio de estado. Son tan notables las particularidades relativas á estas modificaciones de estructura en tres cuerpos simples, tres metaloides, el azufre, el selenio y el fósforo, que no podemos dispensarnos de describirlas con algunos detalles.

V

ESTADOS ALOTRÓPICOS DEL AZUFRE, DEL SELENIO Y DEL FÓSFORO

El punto de fusion del azufre es 115°, como se puede ver en el cuadro anterior. Si se calienta poco á poco azufre sólido en un matraz hasta dicha temperatura, se le verá volverse líquido, conservando su color amarillo, y su fluidez será entónces comparable con la de un aceite graso. Echando en agua fria una porcion de azufre líquido á dicha temperatura de fusion ó á otra algo mayor, se solidificará en fragmentos globulares, muy quebradizos, recobrando el aspecto comun del azufre amarillo; pero si se continúa calentando el matraz hasta unos 150°, se verá cómo se espesa el líquido, cuyo color es ya más oscuro; la viscosidad irá aumentando con la temperatura y el color pasará del rojo al rojo pardo. Esta consistencia pastosa llega á su máximum á los 230°, y entónces se puede volcar la vasija que contiene el azufre sin que se vierta una sola gota. Enfriado bruscamente en agua, subsiste blando y trasparente. El *azufre blando* (tal es el nombre que se le da en este caso), calentado á más de 230°, se va haciendo poco á poco ménos viscoso, sin dejar de conservar su color pardo-rojizo; á los 330° ó 340° se torna mucho más líquido, como si hubiera sufrido otra fusion.

El selenio, cuyas propiedades eléctricas hemos tenido ocasion de explicar al describir el fotófono, se presenta, como el azufre, en cuatro distintos estados físicos; selenio *negro*, *rojo cristalizado*, *rojo amorfo* ó *vítreo*, insoluble en el sulfuro de carbono, y por último *rojo amorfo y soluble* en el sulfuro de carbono. Calentado el selenio vítreo á más de 100°, se vuelve pastoso y parecido al lacre derretido; segun Mitscher-

lich, es entónces idéntico al selenio negro, cuyo punto de fusion es 217°, y en su estado pastoso se le puede estirar formando hilos, de color de rubí por trasparencia.

Ya hemos visto que el fósforo comun tiene su punto de fusion á unos 44°. Calentado á 70° y enfriado bruscamente, se trasforma en una masa opaca negra que, mediante una nueva fusion y otro enfriamiento lento, reproduce el fósforo comun. El fósforo *negro* es más blando que el otro. Pero la forma más interesante de este metaloide es la conocida con el nombre de fósforo *rojo* ó *amorfo*. Schrœter ha demostrado que se forma por la accion prolongada de una temperatura de 250° sobre el fósforo comun. La sustancia obtenida con este procedimiento forma masas compactas, que tienen el aspecto de la hematita, de fractura concoidea y brillante, ó bien un polvo de color de carmin. A más de 250°, el fósforo rojo se derrite, y á los 360° se convierte de nuevo en fósforo comun. Las propiedades de estos dos estados singulares de una misma sustancia son tan distintas que se la tomaria por dos cuerpos simples diferentes: color, estructura molecular, densidad, calor específico, solubilidad, olor, inflamabilidad, alterabilidad al aire libre, accion en los órganos, todo difiere de uno á otro. Hé aquí el cuadro de estas diferencias, segun M. Cahours:

FOSFORO COMUN	FOSFORO ROJO
Incoloro.	Rojo escarlata.
Cristalizable.	Amorfo.
Densidad variable entre 1,82 y 1,84.	Densidad sensiblemente igual á 2.
Calor específico = 0,1887.	Calor específico = 0,1668.
Muy soluble en el sulfuro de carbono, soluble en los aceites grasos y volátiles.	Insoluble en el sulfuro de carbono, en los aceites esenciales y en los grasos.
Inmediatamente alterable al aire libre y fosforescente.	Apénas alterable al aire libre y no fosforescente.
Inflamable á los 60°.	Inflamable á mas de 250°.
Hierve á los 290°.	Calentado á los 260° en el vacío ó en un gas inerte, pasa de nuevo al estado de fósforo comun.
Se combina con el azufre á la temperatura de fusion de este cuerpo, con explosion.	Se combina con el azufre á + 230°.
Olor particular y característico.	Inodoro.
Muy deletéreo.	No deletéreo.

Se ha dado el nombre de *alotropia* al fenómeno de trasformacion que experimentan los cuerpos de que acabamos de hablar, admitiendo así que, por efecto del calor, sus moléculas, ó mejor dicho, sus átomos constitutivos se agrupan de un modo muy distinto á ciertos grados de temperatura.

CAPITULO VII

CAMBIO DE ESTADO DE LOS CUERPOS.—SUPERFUSION.—DISOLUCION.—SUPERSATURACION

I

DIFERENTES INFLUENCIAS EN LAS TEMPERATURAS DE FUSION DE LOS SÓLIDOS

Hemos visto que los sólidos susceptibles de pasar bruscamente al estado líquido por la accion del calor, tienen un punto de fusion fijo, y tan diferente de un cuerpo á otro, que puede servir para caracterizar cada clase de sustancia. Esta temperatura fija de fusion es tambien generalmente la de la vuelta al estado sólido, *solidificacion* ó *congelacion*.

Pero esta ley no es absoluta, y el punto de fusion puede variar por efecto de circunstancias excepcionales. La presion exterior es una de estas causas de variacion, pero es menester que su intensidad sea mucha para producir un cambio perceptible, aunque débil, en las temperaturas de fusion. Para los cuerpos que se dilatan al pasar del estado sólido al líquido, es decir, para aquellos cuyas moléculas se separan á causa del cambio de estado, todo aumento de presion es un obstáculo que contraría la accion del calor, y por lo tanto la temperatura de fu-

sion de estos cuerpos debe de ser más elevada por efecto de esta influencia. Lo contrario debe suceder cuando se trata de cuerpos que, como el hielo, se contraen al licuarse. Los experimentos hechos por Bunsen y W. Thomson han confirmado estas consideraciones puramente teóricas.

El primero de dichos físicos se valia de un tubo doblemente acodado, cerrado por ambos

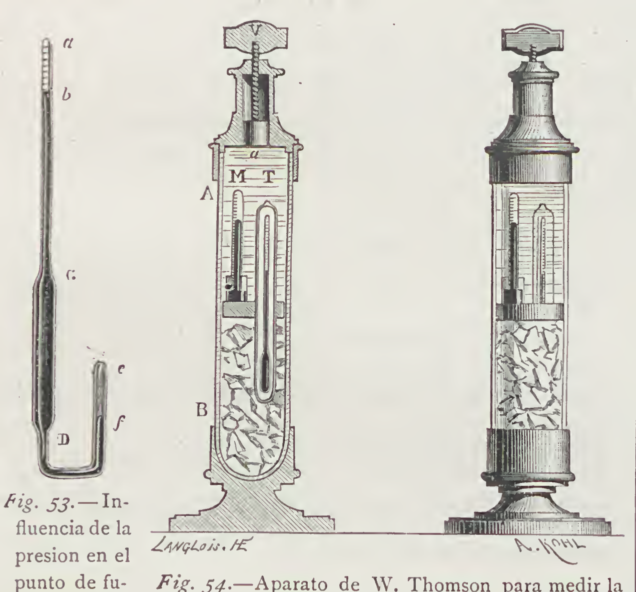


Fig. 53.—Influencia de la presion en el punto de fusion. Aparato Bunsen

Fig. 54.—Aparato de W. Thomson para medir la influencia de la presion en el punto de fusion del hielo

extremos, lleno de mercurio desde *b* hasta *f*. El espacio *ef* estaba ocupado por la sustancia que habia de estudiar, por ejemplo de esperma ó grasa de ballena. El espacio *ab* contenia aire. Calentando en un baño la parte inferior de este aparato, la dilatacion del mercurio comprimia el aire, y este aumento de presion interior reaccionaba sobre la grasa de ballena. En el momento de entrar esta en fusion, se anotaba la presion del manómetro *ab* y la temperatura del baño. Bunsen vió de este modo que el punto de fusion de la grasa de ballena, que es 47°,7 á la presion de una atmósfera, llega á 49°,7 cuando la presion es de 96 atmósferas, y á 50°,9 si de 156: la elevacion es casi proporcional al aumento de presion. Tres experimentos hechos por Bunsen con la parafina han dado por resultado 46°,3 á una atmósfera, 48°,9 á 85 y 49°,9 á 100; aquí ya no hay proporcionalidad.

La fig. 54 representa el aparato ideado por Thomson para comprobar la influencia de la presion en la fusion del hielo. Un cilindro de vidrio, cerrado por arriba y por abajo con virolas de cobre A B, contiene fragmentos de hielo mantenidos en la mitad inferior por un disco de plomo, y agua destilada hasta el remate. La tapa superior da paso á un tapon ó piston metálico *a* que se puede apretar á beneplácito con una llave de tornillo V. La presion ejercida se mide con un manómetro de aire comprimido M, y la temperatura con un termómetro T, cuyos depósito y tubo están resguardados de la presion par una envolvente resistente de vidrio. Como el cilindro contiene siempre hielo y agua en contacto, se considera que el termómetro marca la temperatura de la fusion en cualquier instante del experimento. Hé aquí algunas cifras obtenidas por el experimentador;

1 atmósfera.	0°000
8 »	0°049
16'8 »	0°129

Luego la temperatura de fusion del hielo baja á medida que aumenta la presion.

Este mismo caso se ha comprobado sin necesidad de medida alguna, gracias á un ingenioso experimento de Mousson. La figura 55 representa un tubo de acero muy grueso y resistente, cerrado en su parte inferior con un tapon de tornillo y en la superior con uno más largo de acero, en cuya cabeza hay una palanca merced á la cual se le puede dar vueltas y apretarlo. Se llena el tubo de agua, y ántes de volverlo á cerrar, se introduce en él un fragmento de metal. Volviendo el tubo de modo que el tapon ocupe la parte superior, el pedazo de metal caerá en el fondo de aquel, descansando por consiguiente en la punta del tornillo largo de acero. Hecho esto se mete el aparato en una mezcla frigorífica que congela el agua interior. Si, cuando se ha solidificado el agua, se da vuelta al aparato colocándolo en la posicion figurada en el grabado, es obvio que el pedazo de metal estará entónces sostenido por el hielo puesto en contacto con la punta del tornillo. Haciendo entónces funcionar la palanca se ejerce cierta presion sobre el cilindro de hielo, presion que puede elevarse

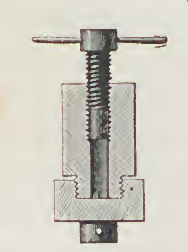


Fig. 55.—Experimento de Mousson sobre el descenso del punto de fusion del hielo

á muchos millares de atmósferas. Si se saca el cilindro, se encuentra el metal en contacto con el tapon como si hubiera atravesado el hielo. Para explicar este cambio de posicion, hay que admitir que la presion ha derretido el hielo permitiendo que el metal atraviese el agua de fusion, puesto que al cesar la presion, ha recobrado aquella el anterior estado sólido por efecto de la baja temperatura de la mezcla en que estaba sumergido el aparato.

Mencionemos tambien en apoyo del mismo hecho los experimentos efectuados por Boussingault durante el invierno de 1870-71 con un cañon de acero, fundido y forjado, de 46 centímetros de longitud, 13 milímetros de diámetro interior y 8 de grueso. Este cilindro estaba horadado hasta 24 centímetros de profundidad: la parte maciza tenia una forma exagonal que permitia cogerla con unas mordazas. La parte superior del cañon, á partir de la abertura, tenia una rosca á la cual se ajustaba, como un perno, una pieza de acero vaciada, en el fondo de la cual se colocaba una rodaja de plomo para asegurar su cierre. Una bala de acero metida en el cañon indicaba con su movilidad ó su inmovilidad si el agua del tubo estaba congelada ó no. Expuesta sucesivamente el agua contenida en el cañon, durante el trascurso de diciembre y enero, á temperaturas exteriores que variaron entre —10° á —24°, permaneció constantemente líquida, segun pudo comprobarse por el sonido metálico producido por la bolita de acero al caer en el fondo. Mas tan luégo como se desatornilló la tapa del cañon y se hubo suprimido la presion, el líquido se congeló instantáneamente. «Calentando entónces el cañon de modo que se destruyese la adherencia, se sacó un cilindro de hielo muy trasparente, en cuyo eje habia una fila de burbujillas de aire.»

II

FENÓMENOS DE SOBREFUSION

Los experimentos descritos en el artículo anterior prueban que en estas circunstancias es posible hacer que descienda la temperatura de un líquido bajo el punto de solidificacion ó de congelacion sin que esta sobrevenga. Dase el nombre de *sobrefusion* á este fenómeno que puede ocurrir en distintas condiciones.

Fahrenheit y Blagden fueron los primeros físicos que llamaron la atencion sobre estos casos. En 1724 Fahrenheit llenó de agua una redoma de vidrio de cuello angosto, cerrándolo á la lámpara á fin de impedir el contacto del aire con el líquido, y pudo así mantener la redoma á muchos grados bajo cero sin que el agua se congelara. Habiendo roto la punta del gollete pudo entrar el aire, y sobrevino la congelacion instantáneamente, efecto que atribuyó al contacto del aire. Con todo, otra vez, al trasladar una redoma semejante, cerrada, y llena de agua líquida bajo cero, dió un paso en falso que imprimió una brusca sacudida á la redoma y el agua se congeló súbitamente como en el primer experimento. Así pues, parece que otra de las condiciones del fenómeno es el reposo perfecto del líquido. Para que haya sobrefusion es menester que el líquido se enfrie poco á poco, resguardado del contacto del aire con una capa de aceite esparcida por su superficie ó por otro medio, y que esté exenta de toda agitacion brusca, lo cual es más fácil si se le contiene en vasijas pequeñas ó en tubos de escaso diámetro. De este modo se baja la temperatura del agua hasta á —12°. Valiéndose Despretz de tubos termométricos vió que el agua podia bajar hasta á —20° sin congelarse. Sabido es que esta se dilata de —4° á 0°; luego al enfriarse de 0° á —20° su volúmen sigue aumentando; pero cuando se solidifica, la expansion brusca del volúmen rompe el tubo que la contiene.

De los experimentos efectuados hasta aquí acerca de la sobrefusion se desprende un hecho importante: que, sea cualquiera el descenso de la temperatura del líquido bajo su punto ordinario de congelacion, tan luégo como sobreviene ésta, la temperatura de toda la masa solidificada sube inmediatamente al punto fijo. Así, el agua enfriada por Gay-Lussac y por Despretz hasta á —12° y —20°, vuelve á cero apénas se solidifica. Este aumento brusco de la temperatura no puede atribuirse más que á la accion del calor latente de liquidez, el cual se desprende no bien comienza la congelacion, y se hace sensible calentando hasta el punto normal de solidificacion las partes todavía líquidas, que no dejan de congelarse por este aumento de calor.

M. L. Dufour ha hecho interesantes estudios del fenómeno de la sobrefusion, valiéndose de

un método que le permitió especificar mejor las condiciones en que se produce. «Aislando el agua de todo contacto sólido, dice, y colocando este flúido en un medio de la misma densidad y que no forme mezclas acuosas, he podido obtener con mayor seguridad el retraso de la congelacion. El agua toma, en una mezcla de cloroformo y aceite en proporciones convenientes, la forma de esferas perfectas y se mantiene en equilibrio en el interior de la mezcla. Si se enfria ésta, nótase que el agua, en tal estado globular y en este aislamiento de todo sólido, casi nunca se hiela á 0°; su temperatura baja á —6°, —10°, etc., ántes que ocurra el cambio de estado. Hasta glóbulos, líquidos todavía, han pasado así á 20° bajo cero.

»Aquí se trata del agua comun, ni destilada ni siquiera hervida. El aceite que, despues de varios ensayos, ha parecido más conveniente para estos enfriamientos bastante considerables, es el de almendras dulces.»

M. Dufour ha visto que, en estas condiciones, el estado líquido ofrece una estabilidad notable, habiéndose podido agitar y deformar glóbulos de cinco á seis milímetros de diámetro sin que sobreviniera la solidificacion, y áun se pudo introducir cuerpos extraños, cristales salinos, á temperaturas de —10°. En cambio la introduccion de un fragmento de hielo producia siempre é instantáneamente la congelacion. La chispa de una botella de Leyden, el paso de una corriente eléctrica han sido impotentes para producir el cambio de estado, pero la descarga de una máquina de Ruhmkorff lo ocasionaba siempre.

Con el mismo método ha podido Dufour comprobar el fenómeno de la sobrefusion en el fósforo, el azufre y la naftalina. Se han enfriado á —115° y hasta 50° glóbulos de azufre en suspension en una disolucion de sulfato de zinc, sin que dejaran de ser líquidos, y se han mantenido líquidas las gotas de fósforo hasta á 0°. La naftalina, que se solidifica á 79°, se ha conservado líquida en el agua hasta 55°. Segun acabamos de decir con respecto al agua, en todos estos experimentos la solidificacion ocurre instantáneamente si se introduce en el líquido un fragmento sólido de la sustancia sujeta al experimento.

El fenómeno de la sobrefusion ha sido objeto de nuevas investigaciones por parte de M. Gernez, el cual ha visto, así como Dufour, que el líquido se solidifica instantáneamente introduciendo en él una pequeñísima cantidad de la materia en estado sólido ó pulverulento; ha hecho ver además que el contacto de una partículo sólida de un cuerpo isomorfo y hasta el simple roce de dos cuerpos sólidos en el seno del líquido producian el mismo efecto.

Más arriba hemos visto que para que pase un líquido al estado de sobrefusion, se le debe sustraer en lo posible á toda causa de agitacion. Sin embargo, parece que el movimiento de las masas líquidas favorece el descenso de la temperatura bajo el punto de su fusion, de lo cual nos presenta un ejemplo el agua de los rios que no se congela sino cuando la temperatura del aire exterior ha descendido notablemente bajo cero. Verdad es que aquí se trata de un movimiento de masa, al paso que en el ejemplo de la solidificacion producida por una agitacion brusca, se trata del movimiento de las moléculas en el seno del líquido.

III

LIQUEFACCION POR VIA DE DISOLUCION. — SOLUCIONES SATURADAS Y SOBRESATURADAS

El paso de un cuerpo del estado sólido al líquido no se efectúa solamente por vía de *fusion*, ó por la accion directa del calor elevado á una temperatura ordinaria, sino que tambien puede efectuarse por vía de *disolucion*. Entiéndese por esto, en términos generales, el acto en virtud del cual un líquido forma con otro cuerpo sólido, líquido ó gaseoso, un nuevo líquido homogéneo. Aquí sólo debemos ocuparnos de la disolucion de los sólidos, haciendo abstraccion de la parte química del fenómeno.

El exámen más sencillo y familiar de la disolucion de un sólido es el de un terron de azúcar ó de sal comun que se echa en cierta cantidad de agua: al poco rato, el azúcar ó la sal no se distingue ya del resto del líquido. Agitándolo para que la mezcla sea completa, da por resultado un nuevo líquido homogéneo, agua azucarada ó agua salada. El ejemplo que acabamos de tomar es el de una disolucion de órden puramente físico, ó disolucion simple; pero las más de las veces interviene en el fenómeno una accion química, una combinacion. Disolviendo

por ejemplo ácido sulfúrico anhidro, el agua ejerce una reaccion química sobre este cuerpo, y forma en realidad con él un nuevo compuesto y no una simple disolucion; ha resultado una nueva agrupacion de moléculas entre los dos cuerpos en presencia. El desprendimiento de calor que entónces se produce demuestra sobrado la energía de la reaccion.

Por lo general, el acto de la disolucion trae consigo absorcion de calor, y por este concepto el fenómeno tiene analogía con el de la fusion. Más adelante veremos que el descenso de temperatura que resulta de la disolucion se utiliza para producir un frio artificial cuyo grado depende de la naturaleza de los cuerpos que se mezclan, de su proporcion y de su temperatura inicial. Hé aquí algunas cifras por las cuales se podrá juzgar de estas varias influencias; las tomamos del *Diccionario de química* (art. DISOLUCION) de Wurtz, el cual las reproduce á su vez copiándolas de los resultados obtenidos por Ruhmkorff:

Sales disueltas.	Cantidad mezclada con 100 partes de agua	Temperatura inicial	Temperatura final	Descenso de temperatura
Alumbre cristalizado..	14	+10°,8	+9°,4	1°,4
Cloruro de sodio..	36	12°,6	10°,1	2°,5
Sulfato de sosa cristalizado. . . .	20	12°,5	5°,7	6°,8
Cloruro de potasa.	30	13°,2	0°,6	12°,6
Nitrato de sosa.	78	13°,2	— 5°,3	18°,5
Ioduro de potasa.	140	10°,8	—11°,7	22°,5
Nitrato de amoniaco.	60	13°,6	—13°,6	27°,2
Sulfocionato de potasa..	150	10°,8	—23°,7	34°,5

No todos los cuerpos se disuelven igualmente ó en idénticas proporciones en los mismos líquidos. El agua disuelve la mayor parte de las sales metálicas, y ciertas sales, como el ácido acético y el fórmico, se mezclan con ella en todas proporciones. Los cuerpos grasos, insolubles en el agua, se disuelven en el éter, en los carburos ó en los aceites.

Un peso dado del líquido disolvente no es capaz, por lo comun, de disolver más que una cantidad limitada del cuerpo. Cuando llega precisamente á este punto, dícese que está *saturado*. Pero este punto de saturacion depende de la temperatura, y la cantidad máximum de la sustancia disuelta va creciendo por lo general con aquella y á veces proporcionalmente á la misma. Sin embargo, si el sólido no contrae ninguna union química con el disolvente, no sucede así. Gay-Lussac ha figurado por medio de curvas la solubilidad de cierto número de sales y las relaciones de esta solubilidad con la temperatura, de cuyas curvas se deduce que la de los cloruros de potasa y de bario y la del sulfato de zinc es proporcional á la temperatura; la de nitratos de potasa, barita y sosa crece más rápidamente que la temperatura, y la del cloruro de sodio es independiente de ésta.

La solubilidad de los nitratos de sosa y de potasa, así como la del sulfato de sosa cristalizado, es muy grande. El último presenta una particularidad interesante; su solubilidad crece tambien con la temperatura, pero sólo hasta los 33°; pasados estos dicha solubilidad disminuye, y al llegar á los 15° no es mayor que á 0°.

Hemos dicho ántes que toda solucion sólo podia contener una proporcion determinada de un cuerpo por cada temperatura: entónces está saturada. Si se eleva la temperatura, este estado de saturacion desaparece por lo comun, por ser el líquido susceptible de disolver más cantidad del cuerpo. Pero ¿qué sucede cuando se deja enfriar la solucion saturada más abajo del punto de saturacion? En este caso puede presentar dos alternativas, como en el de un líquido enfriado bajo el punto de fusion. O el excedente de sal disuelta se deposita en forma de cristales, ya en la superficie de la disolucion, ó bien en el interior adhiriéndose á las paredes de la vasija que la contiene, en los puntos en que estas tienen algunas asperezas, lo cual sucede cuando el líquido se enfria poco á poco; ó la solucion sometida al enfriamiento continúa clara y límpida, sin que se formen cristales, pudiendo bajar su temperatura más allá del punto de saturacion. Entónces se dice que está *sobresaturada*.

La *sobresaturacion* corresponde al fenómeno de la sobrefusion y ocurre en circunstancias análogas, es decir, cuando la solucion está al

abrigo del aire, de la agitacion, y sobre todo con la condicion de que no se deje caer en ella ninguna partícula sólida del cuerpo disuelto ó de uno isomorfo, pues si se echa un fragmento de él cesa al punto, y entónces sobreviene espontáneamente la cristalizacion, sucediendo, como en el caso de la sobrefusion, que la temperatura sube precisamente al punto correspondiente á la saturacion.

Para obtener fácilmente una solucion sobresaturada, se procede como lo indica la figura 57. En un tubo terminado en una parte muy angosta se echa una disolucion concentrada de sulfato de sosa por ejemplo, que se ha tenido cuidado de introducir en él á una temperatura elevada, y se le calienta con una lámpara de alcohol. Hasta que el líquido entra en ebullicion (á los 103°) el vapor va expulsando el aire, y

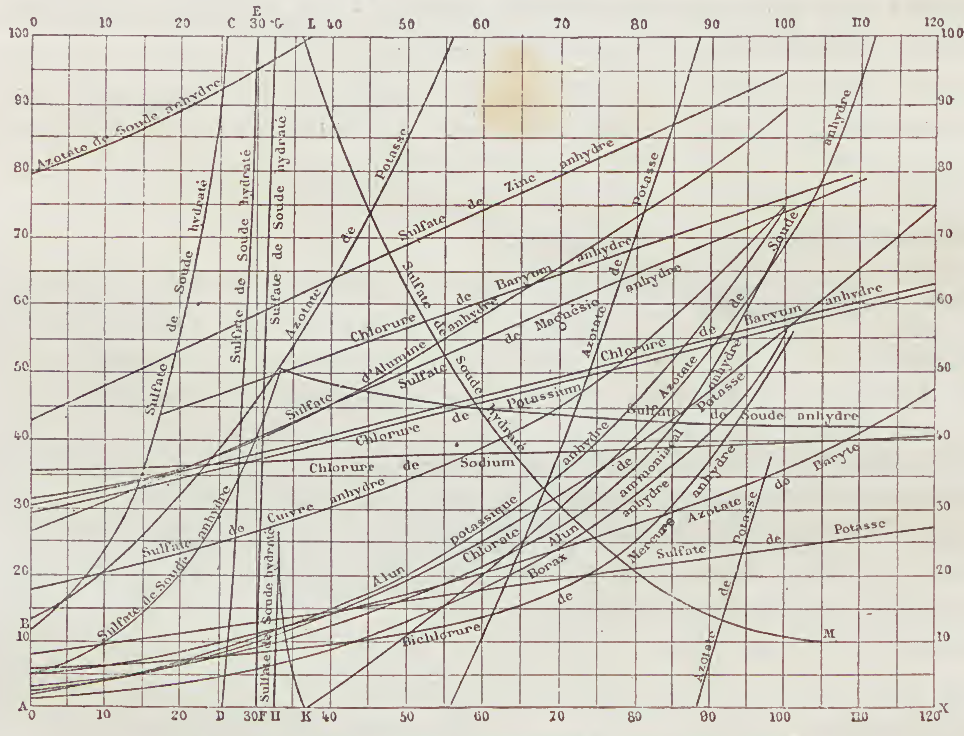


Fig. 56.—Curvas de solubilidad de ciertas sales, segun Gay-Lussac

una vez totalmente desalojado éste, se cierra el tubo á la lámpara. Si se deja enfriar poco á poco la solucion así obtenida hasta más abajo del punto de saturacion, permanece clara y límpida, pero si se rompe la punta aguzada del tubo, el aire penetra bruscamente y produce en seguida la cristalizacion.

M. Gernez, que ha hecho un detenido estudio de los fenómenos que se observan en las soluciones sobresaturadas, ha puesto en evidencia el desprendimiento de calor dimanado de una cristalizacion rápida. Hé aquí dos experimentos que así lo demuestran. En una vasija que contenga una solucion sobresaturada de hiposulfito de sosa, se mete un termómetro de aire que se habrá limpiado perfectamente para evitar una cristalizacion prematura, y se anota la posicion del índice. En seguida se echa un cristal de hiposulfito de sosa en el líquido, lo cual engendra la cristalizacion, y entónces se ve que el índice del termómetro emprende un rápido movimiento de ascension. Se puede tambien echar en la superficie de la solucion una capa de éter que entra en ebullicion apénas empieza la cristalizacion: si se ha adaptado préviamente al orificio de la vasija un tapon atravesado por un tubo, el vapor del éter sale por este y se le puede inflamar de modo que se haga visible para muchos espectadores el fenómeno de elevacion de temperatura.

IV

CRISTALIZACION DE LAS SOLUCIONES SALINAS, SATURADAS Ó SOBRESATURADAS

En las soluciones saturadas, lo propio que en las sobresaturadas, el paso del estado líquido al sólido se efectúa por vía de cristalizacion. Pero esta estructura interesante de los cuerpos sólidos, que nos muestra sus moléculas orientadas de un modo regular y geométrico, agrupadas

como edificios arquitectónicos que se repiten variando de grosor, desde los granos más pequeños hasta los fragmentos más voluminosos, no es exclusivamente peculiar de los cuerpos disueltos en un líquido. Los que se han trasformado en líquidos por vía del calor, cristalizan igualmente cuando se efectúa en ciertas condiciones el paso al estado sólido. Los que, como el cristal y las resinas, pasan por un estado pastoso ántes de solidificarse, tomando entónces un

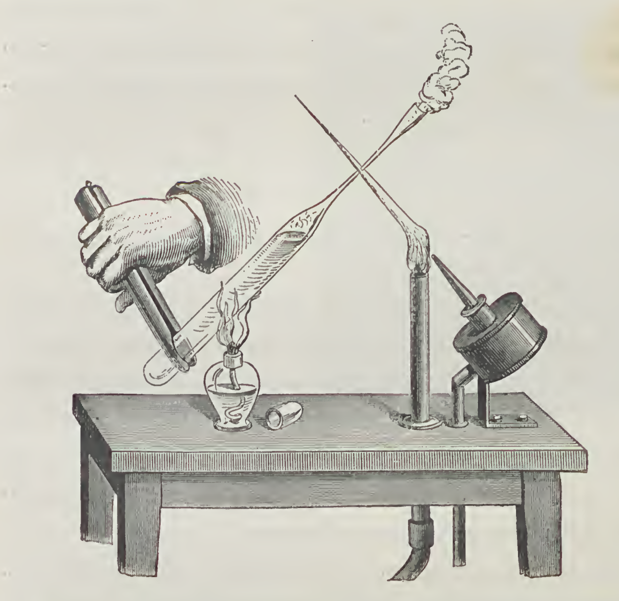


Fig. 57.—Procedimiento para obtener una solucion sobresaturada

aspecto vítreo, son generalmente amorfos, homogéneos, dotados de cierta trasparencia como la de un líquido congelado y no presentan estructura cristalina, en cuyo caso se hallan el vidrio, el azúcar derretido y cuajado, el selenio vítreo, etc. Sin embargo, áun en estos sólidos, se hace á la larga un trabajo interno de cristalizacion que les priva de su trasparencia y homogeneidad.

Los cuerpos en fusion que recobran el estado sólido en virtud de un enfriamiento corto y regular, cristalizan como las soluciones saturadas; los primeros cristales aparecen en la superficie ó en las paredes de la vasija, es decir, en las regiones en que primeramente se hace sentir el descenso de temperatura; poco á poco se van sobreponiendo otros cristales á los primeros, y por fin toda la masa se cristaliza como es fácil observar las más de las veces examinando la superficie de las fracturas. Esta estructura cristalina aparece clara y distinta cuando se examina así un trozo de bismuto, de antimonio ó de azufre. Pero si se quieren obtener cristales aislados, es preciso suspender la cristalizacion ántes que sea completa, lo cual se hace decantando el excedente de líquido. Supongamos que se derrite azufre en un crisol de barro calentándolo hasta unos 120°, y que luégo se le deja enfriar lentamente: cuando llegue á la temperatura de 112° empezará la cristalizacion extendiéndose de la superficie y de las paredes al centro. Entónces se agujerea la costra superior solidificada con una barrita caliente, se vuelca la vasija y se hace salir el líquido aún no solidificado, obteniéndose así una magnífica aglomeracion de cristales amarillo-parduscos en forma de agujas prismáticas dirigidas hácia el centro, forma que no es la de los cristales de azufre tal como se los encuentra en la naturaleza, pues estos son octaedros rómbicos, al paso que los primeros son prismas romboidales oblicuos. Caracterízanse ambos estados alotrópicos del azufre, dando al primero el nombre de *azufre prismático* y al segundo el de *azufre octaédrico*. Cuando á la temperatura ordinaria se abandona los cristales prismáticos á sí mismos, no tardan en perder su trasparencia y su color pardo-amarillento, convirtiéndose en cristales octaédricos. Esta trasformacion singular demuestra que la forma prismática no es estable y explica perfectamente por qué son siempre octaédricos los cristales de azufre natural. El choque, el roce, el contacto con un cristal octaédrico favorecen el paso de una forma á otra. M. Schutzenberger ha obtenido cristales de esta segunda forma abandonando á la evaporacion espontánea una solucion de azufre en sulfuro de carbono; los cristales resultantes son voluminosos y enteramente parecidos á los naturales. Por último, M. Gernez ha ideado un medio muy ingenioso de obtener como se quiera cristales de azufre prismáticos ó bien octaédricos. Con este objeto disuelve azufre en bencina ó en tolueno á una temperatura inferior á 80°, y en seguida deja enfriar la mezcla hasta á 15°, cuidando de ponerla al abrigo de los polvillos atmosféricos. La solucion sobresaturada así obtenida cristaliza en una ú otra forma, segun que el experimentador eche en ella un fragmento de cristal prismático ó uno octaédrico. Más aún; M. Gernez ha logrado producir simultáneamente ambos efectos en una misma solucion sobresaturada, poniendo los

cristales generadores en dos puntos distintos del líquido.

Esto nos conduce á la cuestion de la causa de la cristalizacion en las soluciones sobresaturadas. Lo que hemos dicho ya acerca de ellas basta para hacer presumir que esta causa consiste enteramente en la presencia en el seno del líquido de un fragmento de la sustancia disuelta cristalizada. Los experimentos de Viollette y los de Gernez han patentizado esta verdad. Resulta de ellos que la mayoría de las soluciones continúan sobresaturadas, á lo ménos entre ciertos límites de temperatura, con tal que se las preserve de todo contacto con un cristal del cuerpo disuelto. De esta suerte se pueden conservar muchos meses en estado líquido soluciones de acetato, sulfato é hiposulfito de sosa, de nitrato de cal y alumbre amoniacal, mantenidas á la temperatura ordinaria. Pero si se introduce en ellas la menor partícula de sal en disolucion, la cristalizacion es instantánea. Algunas de dichas sustancias, y en especial el sulfato de sosa y el nitrato de amoniaco, se hallan constantemente en suspension en el aire, diseminadas entre los demás polvillos atmosféricos, como así lo ha reconocido Gernez examinando con el espectroscopio el agua que ha servido para lavar el aire ántes de introducirlo en la redoma que contenia una solucion, habiendo aparecido siempre en dicho instrumento la raya amarilla del sodio.

Tambien se ha notado en él la presencia del sulfato de barita. En las cátedras se hacen dos experimentos interesantes propios para demostrar la accion de un cristal sobre la formacion de otros cristales en las soluciones sobresaturadas. El primero de estos experimentos, discurrido por M. Peligot, consiste en sobreponer en una misma probeta dos soluciones sobresaturadas; la más pesada se compone de hiposulfito de sosa, la más ligera de acetato de sosa, dos sales que no hay en el aire, de suerte que ninguna de ambas soluciones cristaliza al aire libre. Se las deja enfriar, y en seguida se echa un cristal de hiposulfito de sosa en la solucion más densa. El cristal atraviesa la solucion de acetato sin producir ningun cambio en ella, y al llegar á la otra, se forma la cristalizacion alrededor del fragmento. Haciendo la misma operacion con un cristal de acetato de sosa, la primera solucion es la que cristaliza á su vez (1). El segundo experimento prueba que el campo de la influencia del cristal se extiende poco á poco alrededor del punto en que está sumergiddo. Véase en qué consiste: Extiéndese sobre una placa de cristal una solucion siruposa y fria de nitrato de cal. Luégo con una varilla empapada en el mismo nitrato sólido y cristalizado se trazan al azar algunas líneas en el líquido. La cristalizacion despunta al principio por donde ha pasado la punta de la varilla, donde se ven rastros de un color blanco opaco que se forman en el fondo trasparente de la placa, hasta que aquélla invade toda la superficie.

V

EL AGUA Y EL HIELO.—FENÓMENO DE LA REGELACION

Es tan grande el cometido del agua en la naturaleza, que para explicar un gran número de fenómenos naturales, importa conocer á fondo sus trasformaciones por efecto de los cambios de temperatura. Ocupémonos pues de nuevo de los dos cambios de estado de la fusion del hielo y de la congelacion del agua.

Hemos visto que, en ciertas circunstancias, se puede bajar considerablemente el punto de congelacion del agua. Los experimentos que hemos mencionado en el artículo II prueban que este fenómeno de sobrefusion ocurre especialmente cuando una fuerte presion exterior impide que el agua adquiera el aumento de volúmen que necesita su solidificacion. Cuando predomina la fuerza de expansion de las moléculas en vía de cristalizacion, las vasijas más resistentes y las cubiertas metálicas más gruesas se rompen, la temperatura sube á 0°, y la solidificacion instantánea produce singulares efectos, de los que nos han ofrecido curiosas muestras los experimentos del mayor Williams y los de C. Martins y Chancel. Reproducimos aquí (fig. 58) dos efectos del mismo género obtenidos

(1) El periódico *La Naturaleza*, del cual tomamos la descripcion de este notable experimento, da la preparacion en estos términos: «Disuélvense 150 partes en peso de hiposulfito de sosa en 15 partes de agua, se echa poco á poco la disolucion en una probeta de pié préviamente calentada con agua hirviendo, de modo que se llene la vasija hasta la mitad. Por otra parte se disuelven 100 partes en peso de acetato de sosa en 15 partes de agua hirviendo. Se echa poco á poco esta solucion sobre la primera de modo que forme una capa superior y que no se mezcle con ella. Sobre las dos soluciones se extiende una ligera capa de agua hirviendo, y se deja enfriar la probeta lentamente y en reposo.»

por E. Hagenbach, ilustrado profesor en la universidad de Basilea. La primera bomba, puesta al aire libre á la una de la tarde con una temperatura de —12°, permaneció en él hasta las siete de la mañana siguiente; la temperatura, que era á esta hora de —14°,6, habia bajado durante la noche á —18°,4. La bomba habia estallado, pero su tapon de hierro y de tornillo resistió á la explosion. La segunda bomba estalló asimismo, despues de estar once horas expuesta á un frio cuyo máximum llegó casi á —20°, y su tapon fué despedido á gran distancia. La forma rara de los chorros de hielo salidos del proyectil, á modo de dardos que tenian la curvatura de un arco de la superficie, pero uno concéntrico á este arco, miéntras el otro estaba encorvado en sentido contrario, todas las particularidades del fenómeno las ha explicado discretamente el ilustrado observador en su descripcion que omitimos en gracia de la

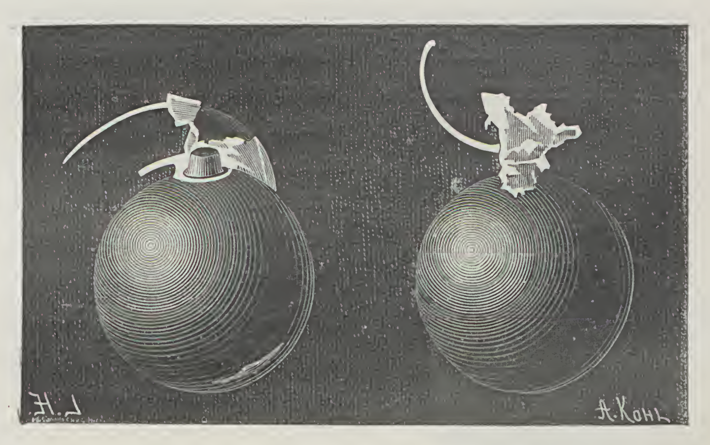


Fig. 58.—Bombas rotas por la fuerza expansiva del hielo

brevedad. Lo que sí debemos hacer constar es que la congelacion instantánea que resulta en el momento en que el agua en sobrefusion hace que el tapon ó las paredes de la bomba cedan en virtud de su fuerza expansiva, no se apodera á la vez de toda la masa del líquido interior. El calor desprendido por la solidificacion de esta masa es más considerable que el que se necesitaria para hacerla pasar á cero desde la temperatura de —15° que tenia. Así pues, aún queda agua líquida en el interior, segun sabíamos ya por los experimentos de C. Martins y Chancel.

Puesto que la presion hace bajar el punto de congelacion del agua, aplicada á un pedazo de hielo debe ser susceptible de licuarlo en parte, sin que la temperatura descienda á bajo cero. Esta consecuencia de los experimentos de W. Thomson, anteriormente descritos, se ha comprobado prácticamente y ha servido para explicar la plasticidad observada en las masas de hielo de los glaciares. Faraday y Tyndall han estudiado todas las circunstancias de este fenómeno interesante. Consideremos un momento los resultados de las investigaciones de estos sabios físicos.

Hácia el año 1850, Faraday observó que si se ponen en contacto por dos de sus caras dos pedazos de hielo fundente, se sueldan uno con otro en los puntos de contacto. El doctor Hooker ha dado á este fenómeno el nombre de *regelacion*, con el cual se le designa ahora comunmente. Tyndall ha ideado una serie de experimentos en que se le pone en evidencia. «Córtense, dice, dos placas de una masa de hielo y pónganse en contacto sus superficies planas; al punto se soldarán una con otra. Si se ponen dos placas de hielo una sobre otra y se las deja durante la noche envueltas en un paño, aparecen á la mañana siguiente soldadas con tanta fuerza que se las podrá romper por cualquier parte ménos por la superficie de su union. Si se entra en una de las cavernas de hielo de Suiza, bastará apoyar un momento un pedazo de hielo contra la pared superior de la caverna para que quede enteramente adherido á ella.

»Échense en un lebrillo de agua muchos fragmentos de hielo, y acérqueseles de modo que se toquen; se soldarán en los puntos de contacto. Se puede formar una cadena con estos fragmentos, y si se coge en seguida uno de los extremos de la cadena, seguirán todos detrás de él. Así es como se forman á veces en los mares polares sartas de grandes témpanos.

»Veamos lo que resulta de estas observaciones. La nieve se compone de pequeñas partículas de hielo: si entónces mediante la presion desalojamos el aire que contiene la nieve fundente y hacemos que los granitos de hielo se toquen, deberán soldarse unos con otros; y si se expulsa el aire enteramente, la nieve comprimida deberá presentar el aspecto del hielo compacto.»

Los muchachos no ignoran esto cuando hacen bolas con la nieve mediante la presion de sus manos, y tambien saben que cuando empieza á derretirse es cuando mejor se trasforma

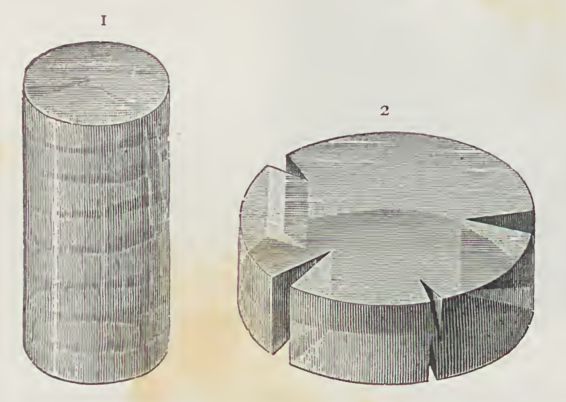


Fig. 59. — 1, cilindro de hielo obtenido por regelacion; 2, el mismo comprimido por sus dos bases

en bolas compactas. Si su temperatura es bastante inferior á 0° para que el calor de la mano no pueda llevar la masa al punto de fusion, permanece quebradiza y forma un polvillo seco que se agrega difícilmente, áun mediante una fuerte presion.

Comprimiendo con una prensa hidráulica pedazos de hielo en moldes de varias formas, Tyndall los trasformaba en una masa compacta y homogénea perfectamente trasparente y con la forma del molde; por efecto de una presion enérgica y por regelacion de pequeños pedazos obtenia esferas, cilindros, copas y anillos de hielo. El mismo resultado se consigue empleando para ello una cantidad suficiente de nieve. La compresion producida por una pequeña prensa hidráulica daba una copa que Tyndall «podia llenar, dice el mismo en sus lecciones, de vino de Jerez fresco, sin que se vertiera una gota.»

Segun J. y W. Thomson, todos los fenómenos de regelacion dimanan de una misma causa: la influencia de la presion en la temperatura de fusion del hielo. Cuando se comprimen dos pedazos de esta sustancia uno contra otro, las partes comprimidas entran en fusion. Pero este cambio de estado no es posible sino mediante una absorcion de calor tomado del hielo circundante. Este calor es latente en el agua de fusion, al paso que la temperatura del hielo desciende bajo 0°. Si la presion cesa entónces, el frio producido ocasiona la regelacion del agua aprisionada entre las partes del hielo puestas en contacto, las cuales resultan soldadas entre sí. La presion necesaria para producir el fenómeno de la regelacion puede ser muy pequeña; por ejemplo, cuando se pone simplemente un pedazo de hielo sobre otro, basta la escasa presion que resulta de su peso. Verdad es que como en este caso el contacto no suele efectuarse sino en corto número de puntos, cada uno de estos recibe mayor parte del peso total.

Tyndall cita un curioso experimento hecho por M. Bottomley con objeto de demostrar que la liquefaccion debida á la presion y la regelacion que la sigue, se efectúan con mayor rapidez cuando la presion se concentra en una pequeña superficie. «Apoyemos, dice, en los extremos de dos mesas los de una barra de hielo de 25 centímetros de largo por 7 de ancho y 10 de grueso, y hagamos pasar por en medio de esta barra un alambre de cobre de uno ó dos milímetros de diámetro, Si reunimos las dos puntas de este alambre y colgamos de él una pesa de 6 á 7 kilógramos, toda la presion ejercida por ella refluirá en el hielo que sostiene el alambre. ¿Qué resultará de aquí? Que el hielo que está debajo del alambre se licua; el agua de licuacion se escapa alrededor del alambre; pero no bien deja de estar sometida á la presion se congela, de suerte que en torno del alambre y áun ántes que este haya penetrado en el hielo, se forma una cubierta del mismo. El alambre continúa penetrando en el hielo, y el agua se escapa sin cesar, pero volviendo á congelarse tras él. Al cabo de media hora la pesa cae; el alambre ha atravesado la barra de hielo en todo su espesor. Claramente se ve la huella de su paso, pero los dos trozos de la barra se han soldado de nuevo con tal solidez que esta se romperá por cualquier punto lo mismo que por la superficie de regelacion.

Faraday ha propuesto una explicacion del fenómeno de regelacion distinta de la de Thom-

son. En su concepto, el punto de fusion es más elevado en el centro ó en el interior de un trozo de hielo que en la superficie; la fuerza de cohesion de las moléculas que rodean á cualquier molécula del interior se ejerce por todos lados para oponerse al cambio de estado; pero en la superficie queda libre de una parte de esta accion. Además, el hielo sólido ejerce en el agua con la cual está en contacto un poder especial de solidificacion, análogo al que ejerce todo cristal en el seno del líquido de la misma naturaleza en el que está en suspension. Cuando se

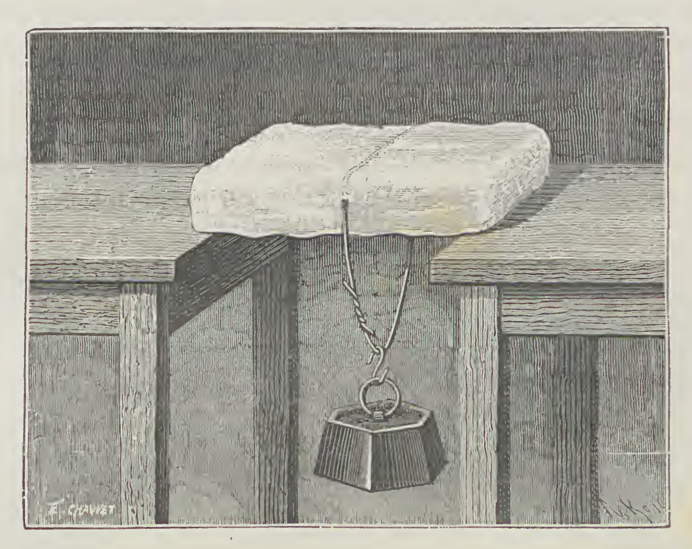


Fig. 60.—Experimento de Bottomley. Seccion de un trozo de hielo por un alambre

ponen en contacto dos pedazos de hielo, la lámina líquida que los cubre está en el interior, y el poder de solidificacion actúa entónces á ambos lados de dicha lámina; así, pues, ésta se congela por efecto de esta influencia y los trozos de hielo resultan soldados. Tyndall, admitiendo esta explicacion de Faraday, no niega la influencia de la presion.

Cualquiera que sea la que se adopte de ambas teorías, no es ménos cierto el fenómeno de la regelacion. Más adelante veremos que basta para explicar las trasformaciones que sufre la masa de un glaciar y la maravillosa manera con que este se moldea poco á poco sobre el valle que ocupa; así como que la aparente plasticidad que resulta de la regelacion, unida á la influencia irresistible de la gravedad, da cuenta de los movimientos de avance de la misma masa, desde las regiones superiores en que se forma por la aglomeracion de las capas de nevazo, hasta la parte inferior del valle por donde se deshace en torrentes de agua cenagosa.

CAPITULO VIII

CAMBIO DE ESTADO DE LOS CUERPOS.—EBULLICION Y VAPORIZACION DE LOS LIQUIDOS

I

SUBLIMACION Y EVAPORACION

La mayor parte de los cuerpos sólidos deben fundirse ó licuarse para pasar al estado de gas ó de vapor; sin embargo, el alcanfor, el iodo, el arsénico y algunas otras sustancias disminuyen de peso al aire libre, sin pasar por el estado líquido; este paso directo de un cuerpo sólido al estado gaseoso se conoce con el nombre de *sublimacion*. Al contrario, el vapor de los cuerpos en cuestion, convenientemente enfriado, puede solidificarse sin pasar por el estado líquido, propiedad que se utiliza para obtener cristales más ó ménos voluminosos. La nieve y el hielo desprenden tambien vapores sin derretirse préviamente; todo el mundo ha podido observar este hecho en tiempo seco y de fuertes heladas,

viéndose fragmentos de hielo ó montones de nieve que disminuyen ostensiblemente de volúmen y hasta desaparecen, sin que haya habido ninguna fusion parcial.

Por lo que respecta á los líquidos, la mayor parte de ellos se reducen espontáneamente á vapor á temperaturas muy diferentes. El agua de que se llena una vasija destapada desaparece poco á poco; los objetos mojados se secan con tanta mayor rapidez cuanto ménos húmedo es



Fig. 61.—Fenómeno de la ebullicion

el aire ambiente y más elevada la temperatura; si se los pone en una corriente de aire, el agua de que están empapados se reduce todavía más pronto á vapor. El mercurio se evapora á las temperaturas ordinarias, como así lo ha demostrado Faraday con el siguiente experimento: suspendió una hoja de oro en un frasco que contenia mercurio, y al cabo de algun tiempo la encontró blanca: el mercurio se habia combinado con el oro, lo cual no podia suceder sino á causa de la evaporacion del primero. Pero hay otros líquidos, como el ácido sulfúrico y los aceites grasos, que no gozan de esta propiedad. Bellani mantuvo dos años una placa de zinc bien limpia suspendida en un frasco que contenia ácido sulfúrico concentrado, y al cabo de dicho tiempo sacó el metal que no habia perdido nada de su brillo.

Este primer modo de pasar los líquidos al estado gaseiforme es lo que se llama *evaporacion*, caracterizándolo el hecho de que, para un mismo líquido, ocurre á cualquier temperatura, y se efectúa únicamente en las capas superficiales. Por el contrario, la *vaporizacion* es la reduccion á vapor por efecto de una elevacion de temperatura en el momento de llegar esta á un límite fijo, determinada para cada líquido, y constante para una misma presion exterior. El líquido entra entónces en *ebullicion*, es decir, que las burbujas de vapor que se escapan de las paredes de la vasija que lo contiene agitan su masa, elevándose á la superficie á causa de su ligereza específica.

Vamos á estudiar sucesivamente estos varios modos de pasar los cuerpos sólidos ó líquidos al estado gaseoso.

Unicamente diremos algunas palabras acerca de la sublimacion ó volatilizacion, es decir, sobre la trasformacion inmediata de los sólidos en vapores; en el capítulo siguiente entraremos en algunos detalles sobre el fenómeno inverso que se ha utilizado para obtener cristales de ciertos cuerpos. Recordaremos ahora solamente que merced al calor de la chispa eléctrica y sobre todo al del arco voltáico producido por las pilas más enérgicas, se ha podido volatilizar los metales, el platino, el oro, y los cuerpos más refractarios, como el carbon, la cal, la magnesia y el óxido de zinc.

Lo que caracteriza á la evaporacion, es decir, á la formacion espontánea de vapores en la superficie de un líquido, es que tiene lugar generalmente á cualquier temperatura, siquiera sea más abundante cuanto más elevada ésta. Así sucede hasta que esta temperatura llega á un punto, fijo para cada líquido, cuando la presion exterior continúa siendo la misma; entónces ocurre el fenómeno de la ebullicion y la vaporizacion que lo acompaña. La evaporacion va siempre seguida de un descenso de temperatura, debido á la absorcion de la cantidad de calor necesaria para que pase el líquido al estado gaseoso. En el acto de la vaporizacion, el calor que requiere esta trasformacion se saca del foco.

Veamos ahora cuáles son las leyes por que se rige la formacion de los vapores.

II

LEYES DE LA FORMACION DE LOS VAPORES EN EL VACÍO

El físico inglés Dalton fué el primero que estudió prácticamente las leyes de la formacion de vapores en el vacío. Hé aquí cuáles son estas y cómo se las comprueba.

Si se introduce en el vacío barométrico cierto volúmen de un líquido cualquiera, verbigracia, un centímetro cúbico de alcohol, en seguida se deprime el nivel del mercurio y se detiene en un punto *b* cuya distancia al nivel *a* de un barómetro metido en la misma cubeta que el primer tubo (fig. 62), marca la tension ó la fuerza

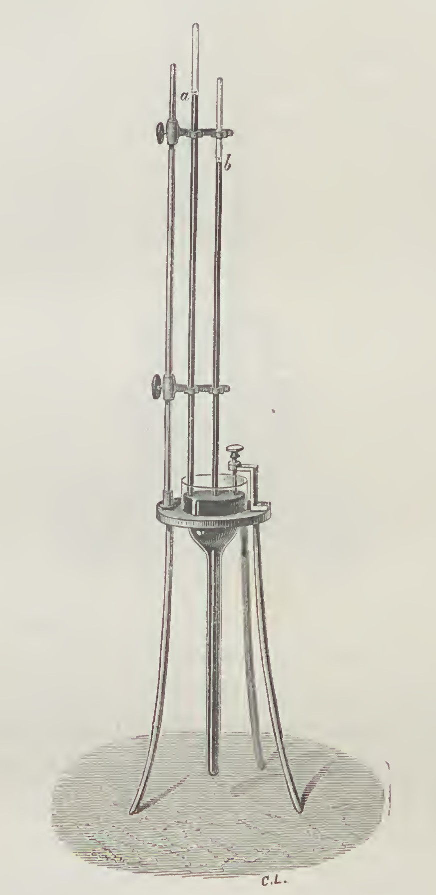


Fig. 62.—Evaporacion espontánea de un líquido en el vacío barométrico. Primera ley de Dalton

elástica del vapor formado. Por aquí vemos ya que los líquidos se reducen espontáneamente á vapor en el vacío.

Supongamos que haya sobrenadado en el mercurio una pequeña capa de líquido. Si se levanta entónces el tubo sin sacar de la cubeta su parte inferior, se ve que el nivel continúa en *b* á la misma altura que ántes; pero la capa líquida de alcohol disminuye de espesor á medida que aumenta el espacio ocupado por el vapor. Se ha formado, pues, una nueva cantidad de éste, sin que su tension haya cambiado, y así sigue hasta que se haya evaporado todo el líquido. Si en este caso se continúa levantando el tubo, lo cual aumenta naturalmente el espacio que puede ocupar el vapor, el nivel del mercurio subirá, lo que prueba que la tension del vapor disminuye. Si se baja de nuevo el tubo, el nivel baja y vuelve al punto *b;* pero si entónces se prosigue el mismo movimiento, el nivel permanece constante al mismo tiempo que una porcion creciente del vapor pasa otra vez al estado líquido.

La figura 62 muestra cómo se dispone el aparato necesario para hacer este experimento. En una cubeta de fondo prolongado de modo que se pueda meter profundamente un tubo, se introducen dos tubos barométricos, uno de ellos fijo y destinado únicamente á marcar el valor de la presion atmosférica miéntras dura el experimento. El segundo tubo está colocado en el eje de la prolongacion de la cubeta. Antes de introducir el líquido (agua, alcohol, éter, etc.), los niveles del mercurio están á la misma altura en los dos tubos. Con una pipeta curva, se introduce el líquido que se ha de vaporizar, por la abertura inferior del tubo central, bajo el mercurio, y gracias á su ligereza específica el líquido se eleva hasta la cámara barométrica, en la cual se observan los fenómenos que acabamos de describir. Si desde el principio sólo se han dejado penetrar algunas gotas de líquido, desaparecen instantáneamente al llegar á la cámara barométrica; introduciendo nuevas gotas, se ve que la depresion del mercurio va aumentando hasta que el líquido aparece á la superficie de aquel, desde cuyo momento cesa la depresion, indicando que la fuerza elástica del vapor ha llegado á su máximum. Este maximum es invariable cualquiera que sea la magnitud del espacio vacío en que se ha efectuado la vaporizacion, miéntras el líquido permanece en contacto con su vapor y no cambia de temperatura. Entónces se dice que el espacio en cuestion está *saturado.* A veces se hace patente esta invariabilidad de la tension máxima poniendo tres tubos barométricos sobre una cubeta de mercurio, puesto que todos indican la perfecta igualdad del nivel.

De estos primeros experimentos resulta: 1.º que un líquido puesto en un espacio vacío se vaporiza en él espontáneamente; 2.º que el vapor así formado llega á un grado de tension máximum é invariable miéntras subsiste en presencia de un excedente de líquido, con tal que la temperatura sea tambien invariable; 3.º si el espacio no está saturado, es decir, si el vapor

no está en presencia de su líquido, haciendo variar el espacio que ocupa, varía su tension, y la ley de compresibilidad es sensiblemente la misma que rige á los gases, ó sea la de Mariotte.

La tension máximum depende á la vez de la naturaleza del líquido y de la temperatura. Veamos cómo se comprueba experimentalmente esta doble dependencia.

Para demostrar que la tension máximum depende de la especie de líquido que se reduce á vapor, se hace uso del aparato representado en la figura 63 y que se conoce con el nombre de *haz barométrico*. Es un conjunto de cierto número de tubos barométricos, en los cuales se introducen varios líquidos, como agua, alcohol, éter, esencia de trementina, etc., en cantidad suficiente para que, á la temperatura exterior comun, quede saturado el espacio de cada cámara. Obsérvase entónces la diferencia de nivel del mercurio en los tubos de líquido, y se pueden medir las diferentes tensiones por comparacion con la altura del mercurio en el barómetro formado por el último tubo de la derecha.

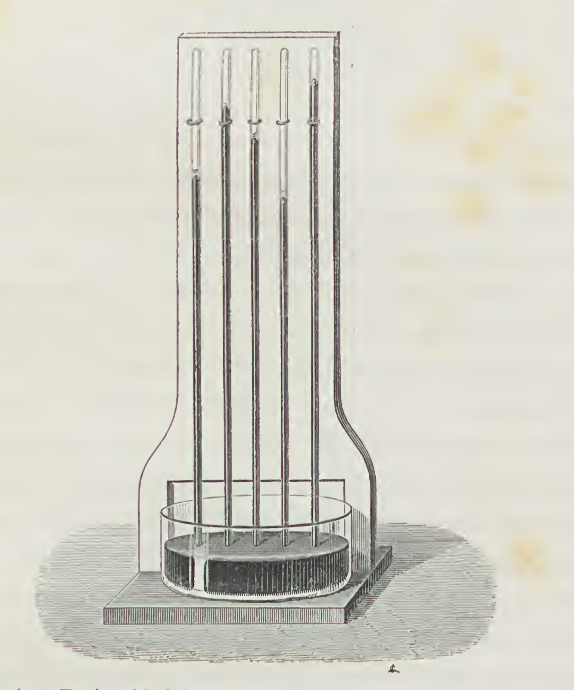


Fig. 63.—Desigualdad de las tensiones máxima de varios vapores á la misma temperatura

Vamos á ver ahora que la tension máximum del vapor va aumentando con la temperatura, segun el líquido. Para demostrar esta ley, se valia Dalton de un aparato parecido al de la figura 62, pero cuyos dos tubos estaban metidos en un cilindro de vidrio lleno de agua que descansaba en la cubeta de mercurio (fig. 64). Calentábase el agua por intermedio del mercurio, y á medida que se elevaba su temperatura indicada por un termómetro sumergido en el

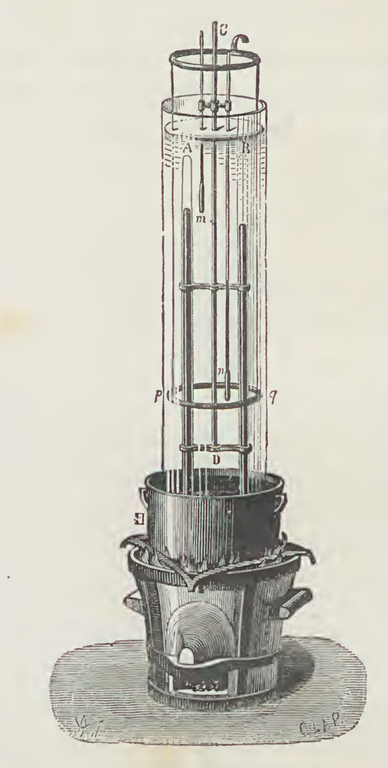


Fig. 64.—Aparato de Dalton para determinar la tension de los vapores sobre 0°

baño, veíase bajar el nivel del mercurio en el tubo cuya cámara contenia el vapor sometido al experimento. Podíase comprobar así la ley en tanto que el nivel no bajaba hasta el del mercurio en la cubeta misma, es decir, miéntras la tension del vapor no llegaba á la presion atmosférica. Más allá de esta, Dalton empleaba un tubo encorvado análogo al que sirve para la ley de Mariotte; la porcion cerrada, ó sea la más corta del tubo, contenia el líquido vaporizable y estaba metida en un baño cuya temperatura se elevaba gradualmente. El nivel del mercurio en el brazo abierto iba subiendo, y la tension del vapor podia medirse á cada instante agregando la altura barométrica á la distancia vertical de los niveles del mercurio en los dos tubos.

El aparato que acabamos de describir, representado en la fig. 64, le sirvió á Dalton para medir la tension máximum de los vapores sobre cero. Aparte de la importancia científica de esta tension, es indispensable tener conocimiento exacto de ella á varias temperaturas para los casos en que se emplea el vapor de agua como fuerza motriz; razon por la cual la han estudiado

detenidamente los físicos, y más especialmente Dalton, Gay-Lussac, Dulong, Arago y por fin el malogrado Regnault que dedicó á esta cuestion capital sus maravillosas facultades de precision en las medidas y de ingeniosa sagacidad en la eleccion de los métodos y en la disposicion de los aparatos. Indiquemos sucintamente estos métodos.

Regnault procedia de tres distintos modos segun que la temperatura del vapor cuya fuerza elástica queria medir era inferior á 0°, ó comprendida entre 0° y 60°, ó por fin superior á 60°. En el primer caso, seguia el método empleado ántes que él por Gay-Lussac, valiéndose del aparato reproducido en la fig. 65. Tambien

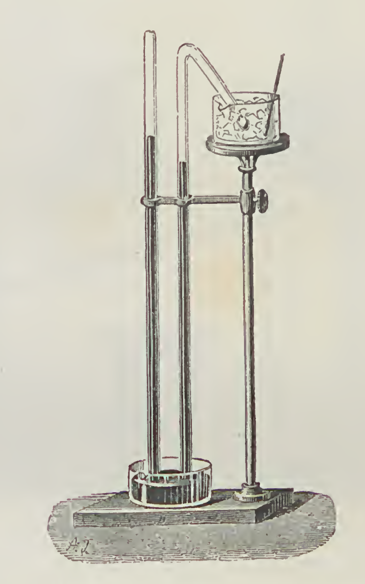


Fig. 65.—Medida de la tension máximum de un vapor á una temperatura inferior á cero

se compone éste de dos tubos barométricos metidos en la misma cubeta, pero la cámara barométrica del que ha de recibir el líquido que se ha de vaporizar es más larga que la del otro y encorvada de modo que se pueda introducir aisladamente en una vasija llena de una mezcla frigorífica. Un termómetro cuyo depósito está sumergido en esta mezcla marca la temperatura. A decir verdad, por este procedimiento tan sólo una parte del espacio ocupado por el vapor se pone á la temperatura de la mezcla frigorífica, y podria recelarse que la parte que se halla fuera influyera en la tension máximum buscada y aumentara su valor. Pero no sucede así, y no hay ninguna correccion que hacer por este concepto. En efecto, segun un principio tan importante para la teoría de los vapores como lo ha sido para la práctica industrial (ha conducido al ilustre Watt á la invencion del condensador de las máquinas de vapor), tan luégo como un vapor llena un espacio cuyas paredes están á temperaturas diferentes, su tension máximum (en presencia de un exceso de líquido) no excede jamás de la que corresponde á la temperatura más baja. Esto es lo que se llama el principio de las *paredes frias*. Examinando lo que ocurre en el caso particular del experimento que describimos, se comprenderá fácilmente este principio. Al llegar el líquido á la cámara barométrica se vaporiza en parte; el vapor invade la porcion encorvada del tubo y como su tension corresponde á la temperatura del líquido, más alta que la de esta mezcla, se condensa en la pared fria; para reemplazarla se forma una nueva porcion de vapor, y así sucesivamente hasta que por esta destilacion el líquido pasa enteramente á la parte encorvada del tubo. El vapor que subsiste entónces tiene por tension máximum la que corresponde á la baja temperatura de la mezcla, etc. La diferencia de nivel del mercurio en ambos tubos indica esta tension, como en los experimentos de Dalton.

El procedimiento empleado por Regnault para las temperaturas comprendidas entre 0° y 60° próximamente es el de Dalton, pero modificado con objeto de evitar las causas de error á que este último exponia. En el aparato de la fig. 66, la caja que contiene el agua calentada por una lámpara de alcohol puesta debajo de ella es poco alta; sólo rodea la parte superior de los tubos, de suerte que con un agitador es fácil obtener una temperatura uniforme en todas las partes del baño. Un cristal entallado en las paredes de la caja permite que se observe la altura del mercurio en los tubos, la cual medía Regnault con un catetómetro. Las dimensiones reducidas de la caja limitan naturalmente este procedimiento á la medicion de las tensiones comprendidas entre 0° y 50° ó 60°.

Para medir la fuerza elástica del vapor de agua á temperaturas superiores á 60° y 100°, se han modificado completamente el método y los aparatos. El principio adoptado por Regnault está deducido de la conocida ley de la ebullicion. Segun esta ley, la tension del vapor de un líquido en ebullicion es siempre precisa-

mente igual á la presion exterior que el líquido soporta en tal momento. Así pues, si se mantiene el líquido en un espacio cerrado y con una bomba de compresion ó una máquina neumática se aumenta ó disminuye progresivamente la presion ejercida en la superficie del líquido, y si al propio tiempo se eleva su temperatura hasta que entre en ebullicion, la presion indicada por un manómetro será el valor buscado de la tension á esta misma temperatura. La figura 67 presenta la disposicion de los aparatos. A es una caldera de cobre, de paredes gruesas y resistentes, en la que se hierve el agua: un tubo inclinado la pone en comunicacion con un

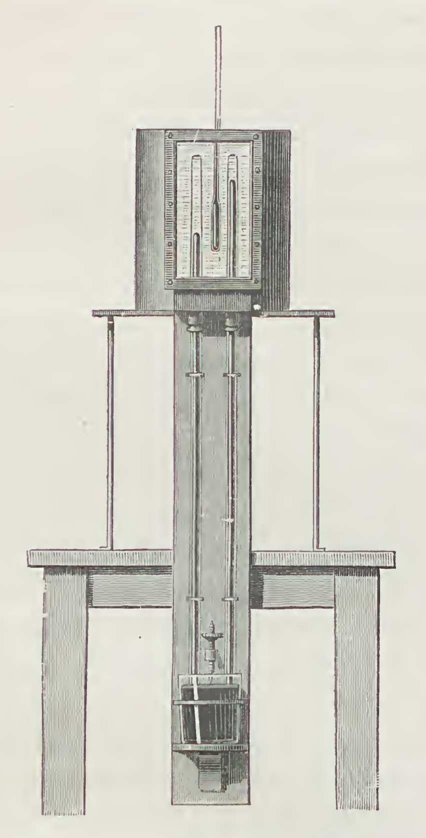


Fig. 66.—Aparato de Regnault para medir la tension de los vapores de 0° á 60°



Fig. 67.—Aparato Regnault para medir la tension de los vapores á temperaturas que pasen de 60°

depósito C rodeado de agua fria, cuyo tubo va metido en un cilindro B por el cual circula constantemente tambien una corriente de agua fria de *a* á *b*. El depósito está puesto en relacion con las bombas neumáticas, y por otra parte con un manómetro de aire libre con el cual se puede medir á todo momento la presion interior. Cuando el líquido de la caldera entra en ebullicion, los termómetros *t* permanecen estacionarios, y se lee en ellos la temperatura. Cuando se ha hecho una observacion, se aumenta la presion, los termómetros emprenden de nuevo su movimiento ascendente, y luégo vuelven á quedarse estacionarios al llegar otra vez al punto de ebullicion, y así sucesivamente. Como el vapor se condensa en seguida que sube por el tubo inclinado, el agua que procede de él cae en la caldera, y de este modo puede prolongarse indefinidamente el experimento.

Quince años ántes que Regnault emprendiera estas determinaciones de tan gran importancia teórica y práctica, Dulong y Arago habian medido las tensiones del vapor de agua saturado á más de 100°. Valíanse al efecto de un generador de vapor, cuya temperatura se media con unos termómetros que penetraban en el interior, protegidos por cañones de escopeta llenos de mercurio, uno en el vapor y otro en el agua de la caldera. Por un tubo que tenia una parte vertical y la otra inclinada oblicuamente, comunicaba la caldera con un depósito de palastro lleno en parte de mercurio. Encima de este y hasta la parte vertical del tubo habia agua que se mantenia á una temperatura constante haciendo circular alrededor del tubo una corriente de agua fria. El depósito comunicaba á su vez por un lado con un manómetro de aire comprimido rodeado de agua

fria, y por otro con un tubo lateral de cristal que permitia observar exteriormente el nivel del mercurio. Es evidente que á una temperatura dada, indicada por los termómetros, la tension del vapor equilibraba la fuerza elástica del aire comprimido en el manómetro, agregando la diferencia de nivel del mercurio en el manómetro y en el depósito y deduciendo la presion de una columna de agua cuya altura es fácil de medir.

Dulong y Arago hicieron así experimentos hasta la temperatura de 224º á la cual la fuerza elástica del vapor de agua era de 24 atmósferas.

Los de Regnault dieron, con una exactitud superior debida al perfeccionamiento de las medidas y á la seguridad de su método, la tension del vapor desde —30º hasta + 230º, comprendiendo así 260º de la escala termométrica. Sus numerosos experimentos le permitieron construir una curva en que cada punto tiene por ordenada la presion del vapor en milímetros y por abscisa la temperatura. Represéntase tambien el valor de estas tensiones mediante una fórmula indicada por M. E. Roche, cuya exactitud ha comprobado Regnault en una gran extension de la escala termométrica y que tiene el mérito de ser aplicable á las tensiones de los vapores de alcohol y de éter. Aquí nos limitaremos á presentar el cuadro siguiente, dando de 10 en 10 grados y con arreglo á los datos de Regnault, la tension del vapor de agua saturado en milímetros y en atmósferas:

TENSIONES DEL VAPOR DE AGUA SATURADO

TEMPERATURAS	TENSIONES		TEMPERATURAS	TENSIONES	
	EN MILIMETROS	EN ATMOSFERAS		EN MILIMETROS	EN ATMOSFERAS
	milím.	atm.		milím.	atm.
— 30°	0,386	0,0005	+ 110°	1075,37	1,415
— 20°	0,927	0,0012	120°	1491,28	1,962
— 10°	2,093	0,0027	130°	2030,28	2,671
0°	4,60	0,006	140°	2717,63	3,576
+ 10°	9,16	0,012	150°	3581,23	4,712
20°	17,39	0,023	160°	4651,62	6,120
30°	31,55	0,042	170°	5961,66	7,844
40°	54,91	0,072	180°	7546,39	9,929
50°	91,98	0,121	190°	9442,70	12,425
60°	148,79	0,196	200°	11688,96	15,380
70°	233,09	0,306	210°	14324,80	18,848
80°	354,64	0,466	220°	17390,36	22,882
90°	525,45	0,691	230°	20926,40	27,535
100°	760,00	1,000			

Acabamos de ver que Regnault limitó sus experimentos hácia los 230º, lo cual se explica si se considera que á los 232º, la fuerza elástica del vapor, igual á 30 atmósferas, comprimia la caldera con tal empuje que se rompió un perno de la armadura que reforzaba sus paredes. Tuvo pues que detenerse, medida de prudencia muy justificada, porque á la presion de 30 atmósferas cada decímetro de la superficie interna de la caldera soportaba una carga de 3100 kilógramos.

Examinando el cuadro precedente se ve que el aumento de presion varía en proporcion mucho más rápida que el de temperatura. De 1 atmósfera, que es la presion del vapor á 100º, pasa ésta á 2 atmósferas á los 121º, á 4 á los 145º; es doble á los 172º, llegando entónces á 8 atmósferas, y por último hácia los 202º equivale á 16. El cálculo enseña que á 266º la tension máximum del vapor de agua saturado llegaria á la enorme potencia de 50 atmósferas.

Todo cuanto acabamos de decir se refiere exclusivamente al vapor de agua. Se han medido tambien las tensiones de los vapores saturados de otros muchos líquidos, habiéndolas determinado Regnault como las del vapor de agua. A continuacion damos los resultados obtenidos con respecto á ciertos vapores empleados ya, ó que podrán serlo en lo sucesivo, como fuerzas motrices en las máquinas. El cuadro que los contiene demuestra cuánto distan los vapores saturados de líquidos diferentes de tener la misma tension máximum á igualdad de temperatura. Pero cuando esta es la de la

ebullicion al aire libre, dicha tension es necesariamente la misma para todos é igual á una atmósfera.

Dalton ha deducido una ley que, si fuese rigurosa, permitiria averiguar las tensiones de cualquier vapor á una temperatura dada cuando se conociera la del vapor de agua á esta misma temperatura. Dicho físico formulaba en los términos siguientes la ley de que hablamos: *Todos los vapores tienen la misma tension á una temperatura igualmente distante del punto de ebullicion de cada líquido.* Esto no es enteramente exacto, segun lo ha demostrado Despretz y reconocido el mismo Dalton; pero las diferencias entre el cálculo, basado en la ley en cuestion, y los resultados de la experiencia son casi insignificantes cuando las temperaturas distan poco de la ebullicion.

TENSIONES DE LOS VAPORES SATURADOS DE VARIOS LIQUIDOS
EN MILÍMETROS DE MERCURIO

TEMPERATURAS	ETER	ALCOHOL	ACETONA	CLOROFORMO	CLORURO DE CARBONO	SULFURO DE CARBONO
	mm.	mm.	mm.	mm.	mm.	mm.
0°	184,39	12,70	63,33	59,72	32,95	127,91
20°	432,78	44,46	180,08	160,47	90,99	298,03
40°	907,04	133,69	419,35	369,26	214,81	617,53
60°	1725,01	350,21	860,96	755,44	447,43	1164,51
80°	3022,79	812,91	1611,05	1407,64	843,29	2032,53
100°	4953,30	1697,55	2796,20	2428,54	1467,09	3325,15
120°	7719,20	3231,73	4552,95	3925,74	2393,67	5148,79
140°	»	5674,59	7007,64	6000,16	3709,04	7603,96
160°	»	»	»	8734,20	5513,14	»

III

FORMACION DE LOS VAPORES EN EL AGUA Y EN LOS GASES.— LEY DE LA MEZCLA DE GASES Y VAPORES

Nadie ignora que el agua y todos los líquidos evaporables emiten vapores, ora al aire libre en un espacio ilimitado, ora en un recinto cerrado y lleno de aire. En el siglo pasado, y ántes de los experimentos de Dalton, hasta se creia necesario el aire para producir la evaporacion, considerándole como disolvente del líquido. En realidad, cuando un líquido se halla en un espacio que contenga aire ó cualquier otro gas en lugar de estar en el vacío, la evaporacion, más lenta en el primer caso que en el segundo, se efectúa siguiendo las mismas leyes. Si el espacio es ilimitado y el aire está en él en reposo, el vapor se formará rápidamente al principio, y luégo más poco á poco, porque las capas que están en contacto con el líquido se aproximarán cada vez más á la saturacion, es decir, al momento en que cesará la evaporacion. Si el aire ó gas que se halla por cima del líquido se renueva, será más rápida la formacion del vapor, porque aquel lo arrastrará consigo á medida que se vaya formando. Diariamente presenciamos ejemplos de estos fenómenos que, segun veremos más adelante, tan importante papel desempeñan en la meteorología atmosférica. El viento seca muy pronto el suelo mojado por la lluvia, cuando el aire dista mucho de su punto de saturacion. Las lavanderas y amas de casa saben perfectamente que la ropa blanca tendida al aire libre se seca mucho más pronto cuando sopla una brisa algo fuerte, si la direccion de esta es la de los vientos secos de la region, es decir, si el aire no está préviamente saturado de vapor.

En un espacio limitado y lleno de gas, la tension máximum del vapor saturado de un líquido cualquiera es precisamente igual á la del mismo vapor en el vacío. Esta ley, descubierta por Dalton, se comprueba prácticamente con un aparato análogo á los que ya hemos descrito. La disposicion especial relativa á la mezcla del gas y del vapor es obra de Gay-Lussac y está representada en la fig. 68. Consiste en un manómetro de aire libre compuesto de dos tubos, uno de los cuales, de mayor diámetro que el otro, tiene en su parte superior una armadura de llave *r* y en la inferior otra llave *r'* que sirve para dar salida al mercurio. Se le llena de este líquido bien seco y en seguida se atornilla á la armadura superior una redoma boca abajo llena del gas tambien seco y provista asimismo de una llave ó espita. Ábrense entónces las tres

llaves; el mercurio sale por la de abajo, y cierta cantidad de gas pasa de la redoma al tubo mayor. Cuando esta cantidad parece suficiente, se cierran las comunicaciones y se echa mercurio en el tubo menor abierto hasta que, segun se ve en la fig. 68, esté al mismo nivel en los dos brazos del aparato; en este momento la presion del gas es precisamente igual á la exterior ó atmosférica. Terminada esta primera parte de la operacion, se quita la redoma y en su lugar se pone un pequeño embudo cuya llave tiene únicamente una ligera cavidad en su superficie. Llénase el embudo del líquido que se ha de vaporizar y la cavidad vuelta hácia su fondo se llena tambien; se da media vuelta á la llave, y presentándose entónces la cavidad enfrente del tubo, deja caer en el espacio ocupado por el gas una gota del líquido. Repitiendo esta maniobra muchas veces, se acaba por saturar el espacio del vapor formado, lo cual se conoce cuando el mercurio no baja ya al tubo, áun en presencia de un exceso de líquido. El volúmen del gas aumenta así, pero se le vuelve á su estado anterior introduciendo mercurio en el brazo abierto del manómetro hasta que el nivel recobre en el tubo mayor la altura que tenia ántes de introducir el líquido. Es evidente que la elevacion de nivel del mercurio del brazo abierto marca entónces precisamente la tension del vapor saturado del líquido en el espacio de volúmen invariable ocupado por el gas. Luego el experimento demuestra que esta tension es igual á la del vapor en el vacío á la misma temperatura.

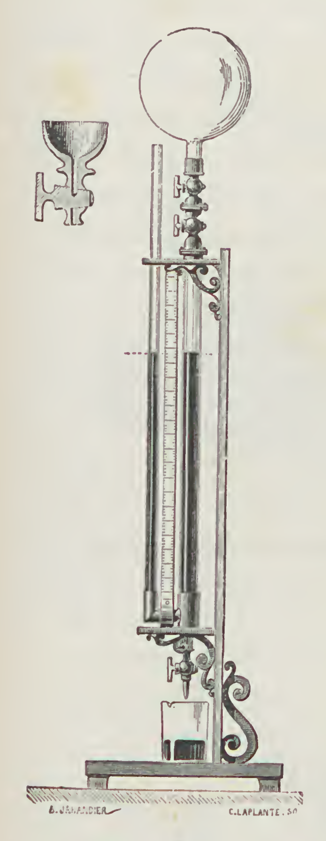


Fig. 68. — Aparato de Gay-Lussac para comprobar la ley de la mezcla de gases y vapores

Sin embargo, esta ley no es rigurosamente exacta; y los experimentos de Regnault, hechos con suma precision, han demostrado que la tension de los vapores es siempre algo más débil en los gases que en el vacío. Por ejemplo, la tension del vapor de agua saturado, á 15° de temperatura, es $12^{mm},70$ en el vacío, y sólo $12^{mm},38$ al aire; á 38°, es $49^{mm},30$ en el vacío y $48^{mm},70$ al aire; á 40°, es $54^{mm},4$ en el vacío y sólo $53^{mm},7$ en el ázoe. Sin embargo, se desprecian tan insignificantes diferencias.

La ley de la mezcla de los gases y vapores, tal como acabamos de exponerla, no solamente es verdadera con respecto á un solo vapor; lo es tambien con respecto á otros muchos que proceden de líquidos de diferentes clases, pero con la condicion de que no ejerzan accion química unos sobre otros. En una palabra, los gases y los vapores mezclados en un mismo espacio tienen una tension total que es igual á la suma de las que adquiriria en él cada uno de por sí.

IV

EBULLICION DE LOS LIQUIDOS. — VAPORIZACION

De todo cuanto precede resulta que el agua, como todos los líquidos, se reduce espontáneamente á vapor á cualquier temperatura, y que la tension del vapor saturado, ya en el vacío, ó bien en un recinto cerrado que contenga otro gas, va creciendo al par de la temperatura, en una intensidad y una proporcion que varian segun los líquidos.

A las temperaturas ordinarias, la trasformacion del agua en vapor por *evaporacion* sólo se verifica en la superficie; ninguna burbuja gaseosa se desprende de la masa interna; únicamente se reconoce que el fenómeno es tanto más rápido cuanto más dilatada relativamente la superficie líquida y más elevada la temperatura. Pero hay que añadir que esta rapidez depende además, así del estado higrométrico del aire ambiente, como de la presion atmosférica miéntras dura el experimento. Veamos ahora lo que ocurre cuando, á causa de la elevacion creciente de la temperatura, se llega al fenómeno conocido con el nombre de *ebullicion*. Tomemos el agua por ejemplo.

Pongamos al fuego una vasija con agua y calentémosla progresivamente. Si la lumbre es bastante activa, en breve se verá cómo se forma el vapor, no tan sólo en la superficie del agua, sino tambien en el seno mismo del líquido. En el fondo y en las paredes inferiores de

la vasija, que son las que están en contacto inmediato con las brasas, aparecen burbujas gaseosas, que se desprenden y suben en forma de conos hasta las capas superiores del agua. Estas primeras burbujas de vapor disminuyen de volúmen al remontarse, y desaparecen ántes de llegar al nivel superior del líquido. Entónces se



Fig. 69.—Primera fase de la ebullicion

oye un rumor particular causado precisamente por la condensacion de todas esas burbujas, ó más bien por el movimiento brusco del agua, que se precipita en cada uno de los pequeños vacíos causados por la condensacion. Esto es lo que se expresa comunmente diciendo que *el agua canta.*

Pero todavía no hierve el agua en este momento: en otros términos, la superficie líquida exterior continúa tersa, tranquila y horizontal. La agitacion procedente de la formacion activa del vapor está aún limitada á las capas inferiores; aún no ha llegado á las más elevadas. Esto consiste en que la elevacion de temperatura no es uniforme; pero las corrientes suscitadas en la masa por la ascension del agua más caliente y por lo tanto más ligera, y el calor desprendido por las burbujas que se suceden sin interrupcion, generalizan muy en breve el fenómeno. Las burbujas de vapor que desaparecian poco ántes sin llegar á la superficie, suben ya hasta ésta, y al reventar rompen el equilibrio, viéndose entónces el hervor en toda la masa. El fenómeno de la ebullicion es ya completo.

Veamos ahora cuáles son las leyes del fenómeno. Estas se refieren por una parte á la temperatura del punto de ebullicion, y por otra á la tension del vapor que se desprende á causa del cambio de estado.

La primera ley, reconocida experimentalmente por Dálton con el aparato de la fig. 64, se enuncia de este modo:

La fuerza elástica de un vapor durante la ebullicion es constantemente igual á la presion exterior soportada por la superficie del líquido en el momento del experimento. Si el líquido hierve al aire libre, la presion barométrica será la medida de la tension de su vapor. Luégo veremos las consecuencias de esta primera ley.

Se la comprueba tambien simplificando el aparato de Dálton, como se ve en la fig. 70. Un tubo encorvado A contiene mercurio de que está lleno su brazo más corto, excepto el espacio ocupado por una corta cantidad de agua. Adáptase el tubo al cuello de una redoma de vidrio medio llena de agua, la cual se pone á hervir. El agua que está por encima del mercurio se reduce por sí misma á vapor (con exceso de líquido, si se ha puesto en cantidad suficiente), y entónces se ve bajar el mercurio en el

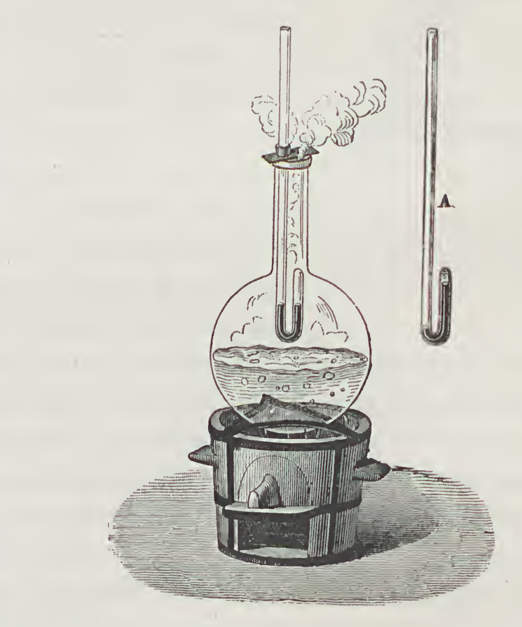


Fig. 70.—Igualdad de la presion exterior y de la tension del vapor

brazo más corto y subir en el otro, hasta tener exactamente el mismo nivel en ambos. Así como en el brazo mayor abierto, la presion atmosférica es la que actúa; viéndose que es precisamente igual á la fuerza elástica del vapor á la temperatura de la ebullicion.

La segunda ley consiste en que, *para una presion exterior dada, la temperatura de ebullicion de cada líquido es fija, y subsiste constante*

miéntras dura el fenómeno (1). Llámase especialmente *punto de ebullicion* á la temperatura de un líquido que hierve á la presion normal de

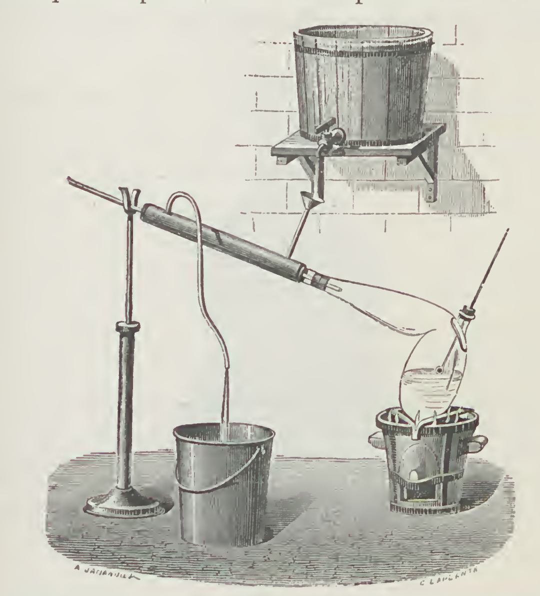


Fig. 71.—Demostracion de la segunda ley de la ebullicion. Aparato de Dálton

760 milímetros. De aquí se desprende una ley cuya exactitud se ha reconocido tambien con respecto á los otros cambios de estado de los cuerpos, la fusion y la solidificacion, y de la cual resulta que un líquido puesto sobre un foco de calor se calienta con rapidez ántes de llegar al punto de ebullicion, pero que una vez llegado, cesa de calentarse, cualquiera que sea la intensidad del calor del foco. Si se le activa, no se consigue otra cosa sino hacer más pronta la vaporizacion, pero la temperatura del líquido ó de su vapor permanece invariable. Esto justifica la eleccion del punto de ebullicion del agua, á la presion de 760 milímetros, como segundo punto fijo de la escala termométrica.

Una consecuencia importante de la constancia de la temperatura miéntras dura el fenómeno de la ebullicion, es que el calor comunicado por el foco á los líquidos para este cambio de estado lo absorbe enteramente el vapor á medida que se va formando. Esto es lo que se llama *calor latente de vaporizacion*, el cual, segun pronto veremos, queda libre ó sensible cuando el vapor pasa al estado líquido.

CUADRO DE LOS PUNTOS DE EBULLICION DE VARIOS LÍQUIDOS Á LA PRESION NORMAL DE 760 MILÍMETROS

LÍQUIDOS	TEMPERATURAS	LÍQUIDOS	TEMPERATURAS	LÍQUIDOS	TEMPERATURAS
Protóxido de ázoe.	— 88°	Eter sulfhídrico.	+ 91°	Yodo.	+ 176°
Acido carbónico.	— 78°	Agua destilada.	100°	Yoduro de plata.	176°
Cloro líquido.	— 40°	Sulfato de sosa (solucion saturada)..	103°	Cloruro de calcio (sol. sat.)	179°,5
Amoniaco anhidro.. . . .	— 35°	Agua de mar.	103°,7	Eter oxálico.	183°
Cianógeno.	— 18°	Carbonato de sosa (solucion saturada).	104°,6	Creosota.	203°
Acido sulfuroso..	— 10°	Petróleo.	106°	Alcanfor del Japon.. . . .	205°
Eter clorhídrico..	+ 11°	Cloruro de sodio (solucion saturada)..	108°,4	Naftalina.	210°
Aldehido.	20°,8	Clorhidrato de amoniaco (solucion saturada).. . . .	114°,2	Alcanfor de Borneo. . . .	215°
Acido hiponítrico.	25°	Bicloruro de estaño. . . .	115°,4	Fósforo.	290°
Acido cianhídrico.	26°,2	Acido acético concentrado. .	120°	Acido sulfúrico monohidratado..	326°
Acido sulfúrico anhidro. . .	32°	Acido nítrico (4 equiv. de agua).	123°	Mercurio.	350°
Eter sulfúrico.	33°,5	Carbonato de potasa (sol. sat.)	135°	Parafina.	370°
Sulfuro de carbono.. . . .	48°	Esencia de trementina. . .	156°,8	Aceite de linaza..	387°,5
Cloroformo.	60°,8	Potasa cáustica (sol. sat.). .	175°	Azufre..	440°
Bromo..	63°			Selenio.	650°
Eter acético.	74°,1			Sodio.	700°
Alcohol absoluto.	78°,3			Cadmio.	860°
Bencina.	80°,8			Zinc.	1,300°
Acido nítrico monohídrico. .	86°				

(1) Esta ley fundamental del fenómeno de la ebullicion puede tambien enunciarse así: «La temperatura de ebullicion de un líquido es aquella á la cual la tension máxima de su vapor es precisamente igual á la presion que el líquido soporta.» Dulong la demostraba experimentalmente con el aparato representado en la fig. 71 y que es, por decirlo así, el experimento inverso de que se valió Regnault para medir la tension de los vapores á grandes temperaturas. El tubo inclinado en que se condensa el vapor formado en la retorta comunica con un globo lleno de aire en relacion con un manómetro. Cualquiera que fuese la presion marcada por éste, dicha presion era siempre exactamente igual á la tension máxima del vapor correspondiente á la temperatura marcada por el termómetro.

V

INFLUENCIA DE LA PRESION EN LA TEMPERATURA DE EBULLICION

Acabamos de ver que la tension del vapor de un líquido en ebullicion es igual á la presion exterior, ó más generalmente á la presion que soporta la superficie del líquido; por otra parte, sabemos que la tension varía, relativamente á un mismo líquido, con la temperatura, y au-

menta á medida que esta crece. La consecuencia que se deduce de ambas leyes es que la temperatura de ebullicion de un líquido debe variar á su vez con la presion, aumentando si esta aumenta, y disminuyendo si disminuye. La experiencia confirma completamente la exactitud de esta consecuencia; pero ántes de presentar ejemplos de las variaciones del punto de ebullicion, ocupémonos del fenómeno mismo y de las circunstancias que lo acompañan.

Al examinar lo que ocurre en una vasija llena de agua que se calienta progresivamente hasta la ebullicion completa del líquido, hemos visto que las primeras burbujas de vapor que se forman en el fondo de la vasija no suben desde luégo á la superficie. La fuerza elástica en virtud de la cual se desprenden aquellas del fondo debe de ser bastante grande para contrarestar la presion que soportan las capas inferiores del líquido, presion que se compone de dos elementos, á saber: por una parte la del agua, y por otra la atmosférica, si se ha calentado la vasija al aire libre. Luego la fuerza elástica del vapor aumenta con la temperatura.

Cuando se forman en el fondo de la vasija las primeras burbujas de vapor, consiste en que la tension de estas burbujas es desde un principio bastante fuerte para equilibrar dicha doble presion; una vez formadas, se remontan á causa de su ligereza específica; pero como no todas las capas de agua que atraviesan tienen la misma temperatura, pues las más elevadas están momentáneamente más frias, las burbujas se enfrian al subir, se condensan por efecto de este enfriamiento, disminuyen de tamaño y por último se deshacen. Esto explica por qué pasan enteramente al estado líquido ántes de haber llegado al nivel del agua de la vasija.

Sin embargo, poco á poco se calienta el agua por todas partes, ya por mezclarse las corrientes líquidas ascendentes y descendentes, ó bien por el calor que le ceden las burbujas de vapor al condensarse, y por fin la tension de estas es bastante grande para que puedan conservar su estado al hacer su ascension completa. Entónces se las ve aparecer á la superficie envueltas en tenues capas de agua hemisféricas. En tal estado sólo tienen que soportar ya la presion atmosférica, y entónces revientan, suscitando en la superficie del líquido un movimiento tumultuoso, indicio visible de la ebullicion propiamente dicha (fig. 72). Es por tanto evidente que en tal momento la tension del vapor es precisamente igual á la presion exterior, á la atmosférica, si la vasija está destapada y al aire libre. El raciocinio confirma lo que demuestra la experiencia.



Fig. 72.—Fase de la ebullicion completa: las burbujas revientan en la superficie

Ocupémonos ahora de los hechos que prueban que la temperatura del punto de ebullicion de un líquido disminuye cuando la presion exterior disminuye á su vez.

Tomemos un globo de vidrio medio lleno de agua á una temperatura inferior á la de la ebullicion al aire libre (fig. 73). Por el tubo de espita de que está provisto, pongámosle en comunicacion con la máquina neumática, y en seguida hagamos el vacío. A medida que se extrae el aire contenido en el globo, disminuye la presion que este aire ejercia sobre la superficie. Cuando



Fig. 73.—Ebullicion del agua en el vacío

el enrarecimiento es suficiente, se ve hervir el agua; sólo que las burbujas de vapor, en vez de partir del fondo de la vasija como sucedia en nuestro primer experimento, nacen ahora en las capas superiores porque la presion es más débil en ellas. Por lo demás la ebullicion pára en breve; lo cual consiste en que, acumulándose el vapor formado, gravita sobre la superficie del agua. Si se continúa haciendo el vacío, vuelve á empezar la ebullicion. Haciendo un vacío tan completo como sea posible, se podria hacer hervir el agua, sin que su temperatura excediese mucho de 0° que es la del hielo fundente. Hé aquí ahora otro experimento que sirve para demostrar que el agua puede hervir ó vaporizarse por ebullicion, á una temperatura menor de 100°, pero siempre por la disminucion

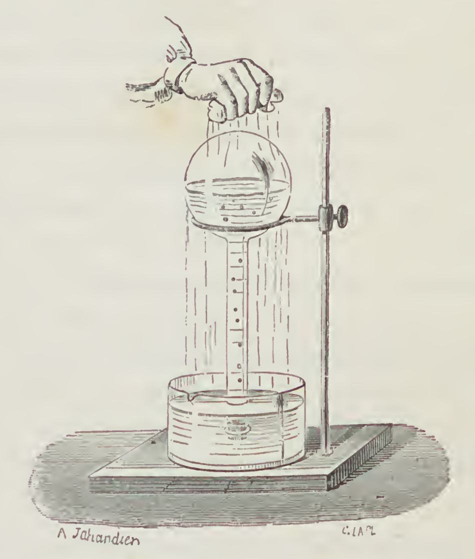


Fig. 74.—Ebullicion del agua por enfriamiento

de la presion sobre la superficie del líquido. Expónese primero al aire libre el agua contenida en una redoma de cuello largo que se coloca luégo en un hornillo encendido, sometiéndola á una ebullicion bastante prolongada para que el aire de la redoma sea expelido por el vapor que se escapa de ella. Tápase entónces la redoma, se la retira del fuego, y á fin de evitar que el aire penetre de nuevo, se la da vuelta metiendo su cuello en el agua de otra vasija. Si se enfria entónces la redoma rociándola con agua fria (fig. 74) ó cubriéndola de pedazos de hielo, el vapor interior se condensa; el vacío que se forma es causa de que disminuya la presion, y la ebullicion empieza otra vez. De este modo parece *que se haga hervir el agua enfriándola.*

Este experimento nos ilustra asimismo acerca de una circunstancia sobrado importante; y es que un descenso cualquiera en la temperatura, vuelve el vapor, en parte al ménos, á su estado líquido, esto es, lo condensa. Pronto nos ocuparemos con mayor amplitud de este fenómeno, inverso del de la evaporacion ó de la vaporizacion.

Finalmente, hay otro modo de hacer hervir el agua á una temperatura menor de 100°: consiste en subir á sitios en que la presion atmosférica sea inferior á 760 milímetros. Y en efecto, la experiencia demuestra que en las montañas el agua hierve á ménos de 100°. Saussure ha visto que la temperatura de la ebullicion del agua en la cumbre del monte Blanco era de 86°, no siendo á la sazon la altura del barómetro sino de 434 milímetros; Bravais y Martins han hecho experimentos por el estilo en los Grands Mulets, en los flancos del mismo monte; el agua hervia á 90° con una presion de 529 milímetros, observando además que en la cima del monte Blanco era la temperatura de la ebullicion de 84°,4, con una presion barométrica de 424 milímetros. En la cúspide del monte Rosa, Tyndall ha visto que el agua hervia á 84°,95. En México la temperatura de la ebullicion es de 92°.

Por consiguiente, la ebullicion del agua no es necesariamente una prueba de la gran elevacion de su temperatura, toda vez que la temperatura del punto de ebullicion baja al mismo tiempo que la presion exterior. En los países de considerable altitud, no se pueden hacer sino difícil é imperfectamente ciertas operaciones culinarias con agua hirviendo. «Asegúrase, dice Tyndall, que para hacer en Lóndres un buen té se requiere absolutamente agua hirviendo á 100°. Si esto es así, no seria posible hacer á esta temperatura dicha bebida con toda su excelencia en los sitios más elevados de los Alpes.»

Compréndese por lo tanto que, si en vez de disminuir la presion soportada por la superficie del líquido, se la aumenta de modo que se la haga pasar de 760 milímetros, la ebullicion se retrasará tanto más cuanto más fuerte sea la presion. En tales condiciones el agua hierve á temperaturas que pueden ser muy superiores á 100°. Un medio muy sencillo de aumentar esta presion consiste en utilizar el vapor mismo,

la fuerza elástica de que está dotado, fuerza que patentizaremos muy en breve y cuyas variaciones estudiaremos con cuidado puesto que en ella está basado el principio de la máquina de vapor.

A Papin, el inmortal inventor de la máquina de vapor, se debe el descubrimiento de este hecho, que supo utilizar inventando la marmita conocida con su nombre, y cuya descripcion publicó en Lóndres, en 1681, con el título de *New Digester*.

Hé aquí en qué consiste la olla ó marmita de Papin.

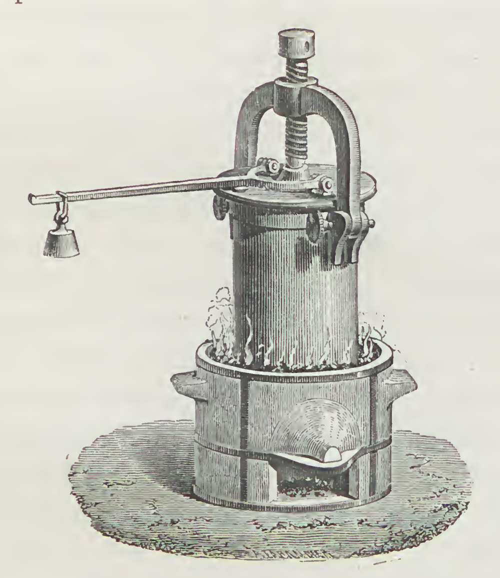


Fig. 75.—Marmita de Papin

Es una vasija ó recipiente cilíndrico, de hierro ó de bronce, de paredes recias y resistentes, tapada con una tapadera del mismo metal que, por medio de un tornillo de presion, va sujeta á los bordes de la vasija. Llenándola de agua en sus dos terceras partes y poniéndola al fuego, fórmase en breve vapor en cantidad siempre creciente; mas como este no tiene salida, se acumula encima del líquido, en cuya superficie ejerce una presion cada vez mayor. El agua puede llegar de este modo sin necesidad de hervir á una temperatura que exceda con mucho de 100°, capaz de fundir ciertos metales, como estaño, bismuto ó plomo (1). Las verduras y la carne se cuecen en ella con más prontitud que en el agua hirviente ordinaria, y las sustancias susceptibles de disolverse, como la gelatina de los huesos, se ablandan y deshacen con mucha facilidad. Valiéndose de la enérgica accion del agua así calentada, con exceso, se ha sacado gelatina de los huesos fósiles que habian pertenecido á mastodontes y otros animales antidiluvianos que vivieron hace algunos millares de siglos.

En ciertas condiciones, la presion del vapor puede llegar á tener una fuerza considerable, que comprimiendo á la vez la superficie del líquido y las paredes de la vasija, la expone á que estalle, haciendo peligroso el experimento. Por esta razon va provista la marmita de una válvula de seguridad. En la tapadera hay un agujero, y sobre la pieza movible que lo tapa se apoya una palanca cuyo brazo mayor sostiene un peso que se puede colgar á una distancia variable, segun el límite de presion del que no se quiera exceder. Si la temperatura del agua es más alta de la que corresponde á este límite, el vapor levanta la palanca y sale silbando al exterior, en donde se condensa á manera de nube; la presion interior disminuye á consecuencia de la salida de este vapor, y desaparece el peligro de la explosion.

La *válvula de seguridad*, tal como la inventó Papin, se emplea hoy en todos los aparatos que tienen por objeto la generacion de vapor.

VI

DIFERENTES INFLUENCIAS EN LA TEMPERATURA DE EBULLICION DE LOS LIQUIDOS

La variacion de la presion exterior no es la única circunstancia que influye en la temperatura de ebullicion de los líquidos, pues tambien ejercen una influencia considerable en ella la naturaleza de la materia que forma las vasijas donde se los calienta, el estado de la superficie de estas vasijas y las sustancias disueltas ó en combinacion en dichos líquidos.

Gay-Lussac fué el primero que observó la influencia de las vasijas, reconociendo que el agua entra en ebullicion en una de vidrio á mayor temperatura que en una metálica. Marcet hizo en 1842 interesantes experimentos acerca de este punto. Resumamos unos y otros.

En una vasija de metal la ebullicion es regular y continua; las burbujas que nacen en las paredes caldeadas son pequeñas y numerosas, y la temperatura del líquido, lo mismo que la del vapor, está á 100°.

(1) Ya hemos visto que el estaño se funde á los 235°; el bismuto á los 265 y el plomo á los 335 centígrados.

La formacion de burbujas gaseosas es más lenta en una vasija de metal cuya superficie interior se haya limpiado de antemano perfectamente; estas burbujas son grandes, pero poco numerosas, y no parece sino que les cuesta trabajo desprenderse del fondo de la vasija. Si se hace hervir el agua en una metálica, las burbujas son más pequeñas, pero tambien más numerosas; véselas salir de todos los puntos del fondo, y como indicio característico de la mayor facilidad en la formacion del vapor, adviértese que el punto de ebullicion es ménos elevado que en la vasija de vidrio, pudiendo ascender la diferencia de 1 á 2 grados. Fácilmente se comprueba esto último. Tomemos una vasija de vidrio que contenga agua cuya ebullicion haya cesado momentos ántes, es decir, cuya temperatura haya bajado ligeramente, y echemos en ella limaduras metálicas; en seguida empezará de nuevo la ebullicion, y lo que prueba hasta dónde llega la influencia de la naturaleza de la sustancia, es que echando de igual manera vidrio en polvo no resulta tanto efecto como con la limadura metálica. El polvillo que hay en el fondo de una vasija de vidrio, y en especial de vidrio *verde*, cuya superficie interna no se haya limpiado préviamente, suscita la formacion de vapor, como sucede cuando se echan en ella limaduras metálicas.

Segun Marcet, el punto de ebullicion del agua destilada, en vasijas de vidrio, varía entre 100° y 102°, segun la calidad del vidrio que se emplea; además la temperatura del vapor que subsiste sensiblemente la misma, es sin embargo constantemente inferior en algunas centésimas de grado á la temperatura de 100° ó del agua que hierve en una vasija metálica.

Si la superficie interior de la vasija (que entónces puede ser indiferentemente de metal ó de vidrio) ha sido dada de barniz de azufre ó de goma laca, la temperatura de ebullicion es, por el contrario, inferior á 100° é igual á 99°,75 ó 99°,80. En este caso el vapor está á la misma temperatura que el líquido hirviente. Pero si se utiliza una vasija de vidrio en que haya habido por espacio de algunas horas ácido sulfúrico concentrado, y luégo se la lava varias veces con agua hirviendo, se puede calentar en ella agua destilada hasta 105° y 106° sin que hierva. A los 100° se desprenden algunas burbujas gaseosas del fondo de la vasija, pero sin que el termómetro deje de subir, aunque despues de haber bajado algunas décimas de grado á cada bocanada de vapor. La potasa concentrada produce el mismo efecto que el ácido sulfúrico. Por último, se observa un retraso análogo en la ebullicion de otros líquidos, por ejemplo del alcohol.

¿Qué razon hay para estas diferencias?

¿Qué es lo que se opone en el cristal á la formacion de las burbujas de vapor?

Probablemente una accion molecular, la adherencia de las moléculas líquidas que siendo muy considerable para con el vidrio, es mucho ménos para con una superficie metálica. El cambio de estado, el tránsito del estado líquido al gaseoso experimenta, para producirse en el primer caso, una resistencia mayor que en el segundo. Cuando ha podido formarse la primera burbuja en contacto con el vidrio, aumenta de volúmen por dos motivos: primero, por aumento de temperatura, y luégo por la formacion de nuevo vapor en la superficie esférica interna de la burbuja. Haciéndose de pronto más fuerte la tension del vapor que la presion soportada, resultan de aquí los saltos repentinos y continuados de las burbujas, y á veces la expulsion violenta de una porcion de líquido fuera de la vasija.

Una molécula de agua calentada á 100° no tan sólo debe vencer la adherencia del agua al vidrio para convertirse en burbujas de vapor, sino tambien la cohesion, la fuerza que une esta molécula con todas las moléculas que la rodean. Esta cohesion es tanto mayor cuanto más pura el agua, y sobre todo cuanto más purgada esté de aire. El aire en disolucion en el agua hace al parecer las veces de un divisor que ha predispuesto las moléculas líquidas para la separacion. Y lo cierto es que la práctica confirma esta manera de ver.

Habiendo echado el físico Deluc agua purgada de aire en un matraz de cuello largo, pudo calentarla hasta 112° sin que entrara en ebullicion. Más adelante, un gran número de experimentos decisivos debidos á M. Donny han patentizado la accion ejercida en la ebullicion del agua por el aire disuelto de ella. Hé aquí uno de estos experimentos.

Un tubo doblemente encorvado y terminado

por uno de sus extremos en una bola contiene agua enteramente limpia de aire. Hase obtenido esta condicion esencial hirviendo el agua en el tubo todavía abierto; el vapor que se desprende expulsa poco á poco el aire del tubo así como el que estaba disuelto en el agua, y tan luégo como se tiene la seguridad de que en el tubo no queda más que agua y vapor, se tapa aquel herméticamente. Así se tiene una especie de

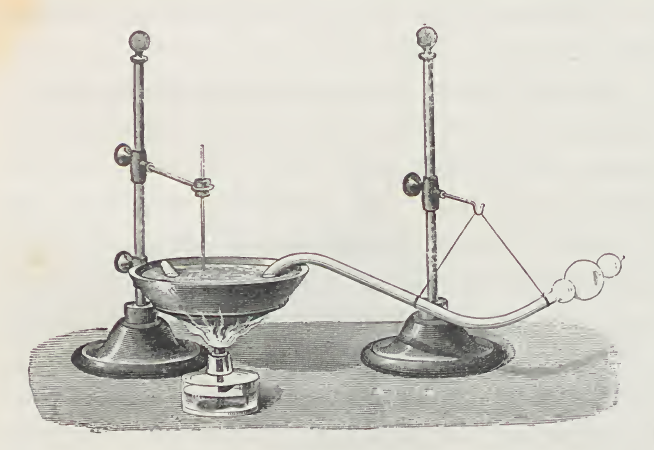


Fig. 76.—Experimento de Donny sobre la ebullicion del agua purgada de aire

martillo de agua cuya parte curva, que contiene el líquido enfriado, se sumerge en un baño de aceite. Caliéntase este con una lámpara de alcohol y entónces se ve por medio del termómetro que se puede hacer llegar la temperatura á más de 130° sin que haya ebullicion. A los 138° se forma el vapor de pronto y tan bruscamente que el agua del tubo es lanzada al extremo situado fuera del baño. Las bolas amortiguan el choque que de esto resulta; pero tambien puede suceder que el aparato estalle con estruendo.

Las circunstancias en que el vapor se forma bruscamente, de un modo irregular y en cantidades mayores que en condiciones ordinarias ó normales, merecen especial exámen, porque pueden presentarse en las calderas de máquinas de vapor y dar lugar á graves accidentes ó explosiones peligrosas.

M. L. Dufour ha hecho curiosos experimentos que prueban que el retraso en la ebullicion no siempre reconoce por causa la adherencia del líquido á la materia de la vasija ni la falta de aire en disolucion. Dicho físico introducia en un baño formado de esencia de clavillo mezclada con una corta cantidad de aceite, algunas gotas de agua que se mantenian en equilibrio en forma de esferas perfectas y se movian libremente en el interior del baño. Calentando este con precaucion, pudo pasar mucho más allá de los 100° sin que hubiera ebullicion. «Con facilidad, dice, se suele llegar á 120°, 130° y más aún. Muchas veces he tenido esferas acuosas de 10 milímetros de diámetro, á 140° y 150°, y otras tantas he podido elevar esferas más pequeñas, de 1 á 2 milímetros de diámetro á 170° y hasta 175°, es decir, á temperaturas en que la fuerza elástica del vapor es de más de ocho atmósferas. Aquí trato del agua que no haya pasado por ninguna preparacion, y por consiguiente ni de la destilada ni de la purgada de aire.» M. Dufour ha obtenido fenómenos semejantes con otros líquidos, habiendo podido elevar la temperatura del cloroformo, que hierve á 61°, hasta 90° y 100°.

Hay evidente analogía entre estos fenómenos de los líquidos *sobrecaldeados* y los que dejamos descritos al tratar de la sobrefusion y de las disoluciones sobresaturadas. Así por ejemplo, el contacto de un cuerpo sólido con las esferas líquidas en suspension en el baño de M. Dufour, produce bruscamente la vaporizacion de estas esferas. Es probable que la influencia del aire sea tambien la que suscite la vaporizacion, pues el cuerpo sólido puesto en contacto con la burbuja líquida retiene siempre en su superficie una tenue capa de este flúido, y tan luégo como esta especie de atmósfera gaseosa llega á tocar un punto de la superficie del líquido, permite á la evaporacion empezar en este punto, y la alta temperatura hace que se propague en seguida por toda la masa.

En todo cuanto acabamos de decir no se ha tratado sino de líquidos que no contienen materias extrañas. Veamos qué clase de influencia es peculiar de la naturaleza de las sustancias introducidas en los líquidos sometidos á la ebullicion.

La experiencia demuestra que las sustancias simplemente mezcladas ó que se hallan en suspension en el agua no modifican la temperatura de ebullicion; pero no sucede lo mismo cuando dichas sustancias están combinadas ó en disolucion.

Si el líquido disuelto, el alcohol por ejemplo, es más volátil que el agua, el punto de ebullicion baja; pero sube, por el contrario, si se trata

de un líquido cuyo vapor se forme con ménos facilidad, como el ácido sulfúrico. Mas el vapor producido no es vapor de agua; es una mezcla ó combinacion de los vapores de cada líquido.

Finalmente, cuando la sustancia disuelta en el agua es una sal, la temperatura del punto de ebullicion es siempre más alta que la del agua pura, y esta elevacion es tanto mayor cuanto más considerable la proporcion de sal disuelta. Así pues una disolucion de sal marina hierve:

á 101°,5 si la proporcion es de	10	por 100;
á 102°,5	—	20	—
á 105°,5	—	30	—
á 108°,0	—	40	—

¿Qué sucede, pues, cuando hierve una disolucion salina? Que la evaporacion la concentra. Cuando se ha logrado la ebullicion, el vapor de agua se forma en gran cantidad, aumenta la proporcion relativa de la sal que queda disuelta y la temperatura sube progresivamente hasta que, habiendo llegado la disolucion á su máximum de concentracion ó estando, como se suele decir, *saturada*, la temperatura de ebullicion permanece ya fija como la de la ebullicion del agua pura, pero siempre á mayor grado que esta.

Una disolucion de sal marina está saturada cuando la proporcion en peso de dicha sustancia disuelta en 100 partes de agua es 41,2; el punto fijo de ebullicion es entónces 108°,4. La disolucion saturada de sal amoniaco contiene 88 por 100 y hierve á 114°,2; la de cloruro de calcio contiene 325 por 100, no hirviendo hasta los 179°,5.

VII

FENÓMENOS DE CALEFACCION.—ESTADO ESFEROIDAL

Cuando se echan algunas gotas de agua sobre un metal incandescente, estas gotas conservan su forma esférica como las de azogue sobre el vidrio ó sobre cualquier otro cuerpo al que no moja; el líquido permanece trasparente, y áun cuando la temperatura del metal exceda con mucho de 100°, no se advierte indicio alguno de ebullicion en las gotas de agua que, sin embargo, se evaporan lentamente, puesto que al cabo de cierto tiempo acaban por desaparecer. M. Boutigny, que se ha dedicado al estudio de estos fenómenos, da el nombre de estado *esferoidal* á esta forma particular de un líquido en contacto con un cuerpo de elevada temperatura. El mismo físico ha adoptado tambien el de *calefaccion*, que nos parece preferible, porque no implica ninguna idea teórica preconcebida.

Describamos las principales circunstancias del fenómeno, y tomemos para ello una cápsula de platino, hierro ó plata, cuya superficie interior esté bien limpia y bruñida, y calentémosla al rojo en un hornillo, ó mejor aún, en la lámpara *colípila* de M. Breuzin (fig. 77). Echemos

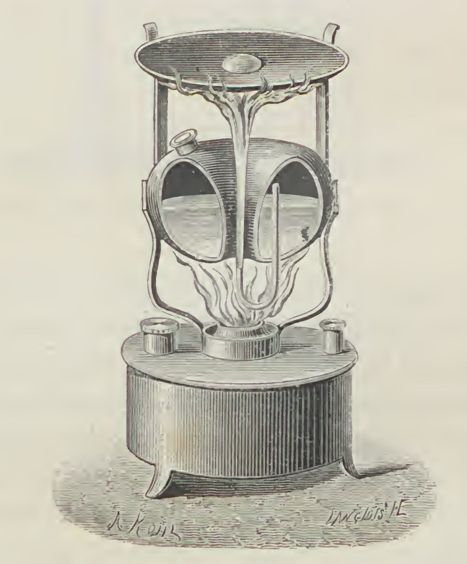


Fig. 77.—Lámpara colípila de Breuzin para el estudio del estado esferoidal

entónces en la cápsula cierta cantidad de agua fria, y veremos que las gotas del líquido reunidas en el fondo del crisol forman un glóbulo que se pone á girar rápidamente sobre sí mismo. Este glóbulo, cuya forma general es la de un elipsoide aplanado, está denticulado en sus bordes y en los contornos de sus paralelos. El número de los dientes de esta especie de estrellas es siempre par, segun lo ha observado M. Laurent, quien atribuye esta apariencia á las oscilaciones ó vibraciones del glóbulo repelido por el vapor que brota por debajo de él. Acabamos de decir que esta evaporacion es por lo comun muy lenta, y se hace mencion de un experimento de Pouillet, el cual pudo conservar muchas horas en un crisol de platino incandescente el agua de que estaba lleno, sin que el peso del líquido disminuyera sensiblemente.

El glóbulo no está realmente en contacto con el metal sobre el cual parece descansar: véase

cómo ha logrado M. Boutigny demostrar este hecho, que se explica fácilmente por la interposicion entre el glóbulo y el crisol de una ténue capa de vapor cuya fuerza elástica basta para mantener separado el líquido. Calentando al rojo un delgado disco de plata perfectamente horizontal, echaba en su superficie la gota de agua á la que habia hecho préviamente opaca con negro de humo ó ennegrecido con tinta; y luégo procuraba mirar á través de ella, á la altura del disco, la llama de una bujía. La llama, interceptada arriba por el glóbulo, y abajo por el espesor de la placa, era perfectamente visible en el pequeñísimo intervalo en forma de menisco que los separaba. Se ha reconocido además que se interrumpe una corriente eléctrica, desde el glóbulo al disco metálico, cuando se pone en comunicacion uno de los electrodos con el líquido y el otro con el metal. Poggendorf fué quien hizo este segundo experimento.

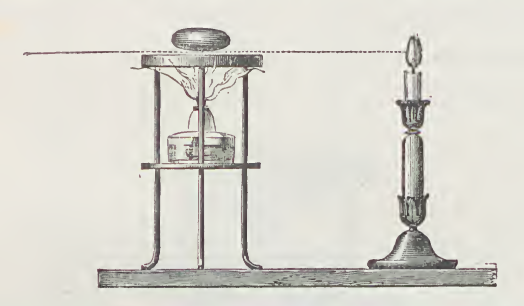


Fig. 78.—Experimento de Boutigny. El glóbulo líquido no toca la placa incandescente

Para explicar esta persistencia del estado líquido del glóbulo en presencia de un manantial de calor tan intenso y cercano, admítese que el fenómeno de la lenta evaporacion que sufre la superficie del líquido absorbe todo el calor radiado. Lo que prueba que en realidad sucede así es la baja temperatura que conserva el glóbulo miéntras dura el fenómeno. M. Baudrimont ha evaluado por primera vez esta temperatura, con cuyo objeto introducia el glóbulo en una masa determinada de agua de temperatura conocida, y por el método de las mezclas (de que en breve trataremos) calculaba su propia temperatura en el momento de la inmersion. Así ha reconocido que era siempre inferior á 100°, pero que se elevaba con la del metal incandescente. Esta última tiene un límite que depende de la naturaleza del líquido y que es tanto más bajo cuanto ménos lo es su punto de ebullicion. De las investigaciones de M. Boutigny sobre el mismo asunto han resultado los números 142°, 134° y 61° para el agua, el alcohol absoluto y el éter. Tales son los límites inferiores de la temperatura que debe tener el metal para que los líquidos susodichos adquieran el estado globular ó esferoidal. Así, cuando se deja enfriar la cápsula metálica á temperatura más baja que la citada, establécese al punto el contacto del glóbulo con el metal, y se produce la ebullicion espontáneamente y con violencia. Hay un experimento que hace ostensible esta brusca vaporizacion del líquido. Calentando mucho una botella de cobre, se echa en ella cierta cantidad de agua que adquiere inmediatamente el estado esferoidal: en seguida se tapa herméticamente la botella y se la deja enfriar, y tan luégo como su temperatura desciende á ménos de 142°, el agua se reduce á vapor, y el vapor así formado tiene tal tension que hace saltar el tapon con violencia.

Segun acabamos de ver, el glóbulo en estado esferoidal se halla siempre á una temperatura inferior al punto de ebullicion del líquido de que está formado. Si es agua, esta temperatura no llega á 100°, ni á 78° si alcohol, ni á 35°,5 si éter sulfúrico, siendo inferior, á —10° si el glóbulo está formado de ácido sulfuroso y á —78° si de ácido carbónico líquido. Esta consecuencia del hecho general que acabamos de mencionar, ha dado lugar á dos de los más interesentes y notables experimentos que se han hecho acerca del asunto. El primero, ideado por Boutigny, consiste en echar en un crisol incandescente ácido sulfuroso anhidro que toma la forma globular y cuya temperatura desciende á ménos de 10° bajo cero. Vertiendo sobre el glóbulo algunas gotas de agua, se congelan, con lo cual se hace hielo en el interior de un crisol calentado al rojo. El segundo experimento lo discurrió Faraday; consistia en sustituir por mercurio el agua del experimento de Boutigny, y por una mezcla de éter y ácido carbónico sólido el ácido sulfuroso. A los pocos segundos, el mercurio estaba congelado. Tyndall reprodujo este experimento de su ilustre maestro, introduciendo en la masa pastosa formada por la mezcla de éter y ácido carbónico sólido una esfera hueca de laton llena de agua. La congelacion de esta hacia estallar la esfera, y se veia aparecer una bola sólida de hielo que salia de

un crisol candente. Echando luégo cierta cantidad de mercurio en una cuchara cónica de cobre, la metia á su vez en el crisol, y al sacarla dándole media vuelta, caia de ella una masa sólida de mercurio.

Eller y Leidenfrest, así como Klaproth y Rumford, habian observado ya en el siglo pasado los fenómenos de *calefaccion* que acabamos de describir; pero desde 1842, Boutigny hizo un estudio detallado de ellos. Los trabajadores de las fábricas de vidrio y de las fundiciones de metales conocian de larga fecha varias de las propiedades que adquieren los líquidos en presencia de los cuerpos incandescentes, y áun los primeros sabian sacar partido de ellas para su industria. Cuando el vidriero ha cogido en la masa de vidrio en fusion cierta cantidad de materia con la *caña*, tubo de hierro hueco que es su principal herramienta, la sumerge en una cavidad abierta en un madero y llena de agua, y dándola vueltas, la redondea poco á poco. Soplando en seguida en la caña, forma una pequeña cavidad en la masa de vidrio, y por el tubo introduce en ella agua, la cual, segun hemos visto anteriormente, se evapora poco á poco sin tocar el cristal siempre incandescente, y el vapor formado agranda la cavidad con su presion. La masa de vidrio toma entónces la forma de bola hueca á modo de pera.

Los herreros saben que una barra de hierro calentada al rojo blanco é introducida bruscamente en agua permanece en ella algun tiempo incandescente: el enfriamiento no es inmediato, pues al rededor de la barra se forma una envolvente de vapor que impide el contacto; empieza la vaporizacion con ruido y el líquido se pone á hervir hasta que salta con violencia fuera de la vasija.

Los fundidores saben tambien desde tiempo inmemorial que es posible meter el dedo ó la mano en un baño metálico en fusion sin quemarse, y algunos de ellos hacen saltar con la mano gotas de metal fuera del crisol, ó lamen impunemente el hierro calentado al rojo blanco. Estas pruebas, que por espacio de mucho tiempo han parecido extraordinarias, inexplicables, y que por esta razon tropezaban con muchos incrédulos, han sido confirmadas y comprobadas personalmente por Boutigny, y repetidas con frecuencia. La explicacion de la incombustibilidad transitoria de la piel y de los tejidos en general es la siguiente: la superficie de nuestra piel está siempre húmeda, humedad que aumenta naturalmente cuando estamos dominados por la impresion involuntaria de una prueba que nos causa repulsion ó temor; al meter la mano en una masa incandescente, la hacemos desempeñar el papel de los líquidos contenidos en vasijas muy calientes: no hay contacto real entre la piel y el metal. Naturalmente cuando se hace esta prueba se debe tener la mano metida muy poco tiempo; pero el doble movimiento de inmersion y de emersion no debe ser muy brusco, como lo recomienda Boutigny, porque la rapidez del movimiento podria ser causa del contacto con el metal en fusion. Las personas que tienen la piel seca deben tener la precaucion de humedecerla ántes con agua ó éter.

VIII

FRIO PRODUCIDO POR LA EVAPORACION Y POR LA VAPORIZACION

Para que una masa líquida se reduzca al estado de vapor, por evaporacion espontánea ó por ebullicion, se requiere siempre cierta cantidad de calor; más adelante veremos cuáles son los procedimientos á que se apela para regular esta cantidad. El calor así absorbido se toma del hogar si se trata de ebullicion, y de los cuerpos circundantes, si de evaporacion. Este último fenómeno tiene por principal carácter un enfriamiento más ó ménos marcado, cuya intensidad depende de la actividad ó de la rapidez con que se produce, y que se ha procurado utilizar en la industria, segun veremos en los capítulos consagrados á las aplicaciones del vapor. Luégo estudiaremos sus leyes, tan importantes para la explicacion de muchos fenómenos naturales; por ahora, nos limitaremos á describir algunos experimentos que sirven para demostrar su realidad.

El primero se conoce con el nombre de *experimento de Leslie*, porque lo ideó el físico así llamado. Sobre una ancha vasija de vidrio ó de porcelana, llena de ácido sulfúrico concentrado, se coloca encima de un soporte metálico una delgada cápsula de cobre en la cual se echa un poco de agua (fig. 79). Pónese todo ello debajo de la campana de una máquina neumática

y se hace el vacío. Al punto sobreviene la evaporacion con tanta mayor actividad cuanto que el ácido sulfúrico absorbe el vapor de agua conforme se va formando, pues ya se sabe cuán grande es la afinidad del primer líquido para con el segundo. El enfriamiento que resulta es á expensas del agua, la cual se congela en breve, pudiéndose sacar de la cápsula un pedazo de hielo.

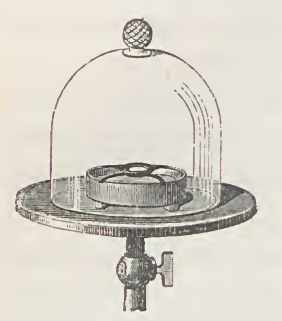


Fig. 79. — Experimento de Leslie. Congelacion de agua por evaporacion

Si se llena de agua la bola de un tubo termométrico, y se la coloca en una vasija que contenga éter, poniéndolo todo en seguida debajo del recipiente de la máquina neumática, bastan algunos movimientos hechos con el émbolo para congelar el agua, gracias al enfriamiento producido por la rápida evaporacion del éter. Tambien se puede prescindir de hacer el vacío, y activar únicamente la evaporacion inyectando aire con un fuelle en el interior de la masa de éter.

La figura 80 representa un pequeño aparato conocido con el nombre de *crióforo*, inventado por el doctor Wollaston para congelar agua mediante su evaporacion en el vacío. Es un tubo doblemente acodado, terminado en dos bolas, una de las cuales A está medio llena de agua, y de la que se ha expulsado el aire por ebullicion; la segunda bola se mete en una mezcla frigorífica. El vapor que se forma en A se extiende por la bola B, donde se condensa á causa de la baja temperatura de la mezcla frigorífica, y el agua que queda en A se congela.

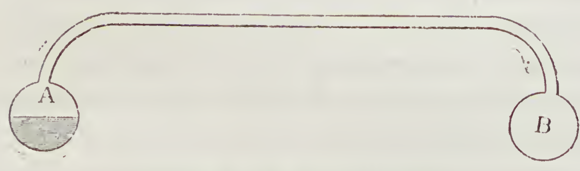


Fig. 80. — Crióforo de Wollaston

Gay-Lussac repitió el experimento de Leslie rodeando tambien la campana de una mezcla frigorífica, con lo cual obtuvo un frio mucho más intenso, bastante para congelar el mercurio. Se consigue el mismo resultado sin apelar al vacío, pero valiéndose del ácido sulfuroso líquido. Hé aquí cómo se prepara la operacion: Introdúcese en un tubo de vidrio cierta cantidad de mercurio, que se cubre de ácido sulfuroso líquido. El tubo está tapado con un tapon de ebonita el cual lleva dos agujeros para dar paso á dos tubos más pequeños. Uno de estos penetra en el ácido y sirve para insuflar en él con una vejiga, aire que se escapa por el otro tubo arrastrando consigo el vapor del ácido sulfuroso á medida que se va formando. La evaporacion causada por esta corriente en el seno del líquido eminentemente volátil atravesado por ella, produce un frio bastante intenso para que en poco tiempo se solidifique el mercurio.



Fig. 81. — Congelacion del mercurio por evaporacion del ácido sulfuroso

IX

LOS VAPORES Y LOS GASES: NOCIONES HISTÓRICAS SOBRE SU NATURALEZA

¿Hay alguna diferencia esencial entre los gases y los vapores? Cuestion es esta que podia agitarse aún hace pocos años, porque la experiencia no habia dado definitivamente su fallo, y que por otra parte no dejaba subsistir ninguna duda en el ánimo de los físicos contemporáneos. Todavía se establecia una marcada distincion entre los gases susceptibles de pasar al estado líquido en ciertas condiciones de presion y de temperatura, por lo cual no diferian de los vapores emitidos por los cuerpos que se presentan en tal estado á la temperatura ordinaria y á la presion atmosférica, y los gases llamados *permanentes* porque no se los habia logrado condensar en forma líquida. Pero creíase generalmente que esta impotencia era puramente relativa, y que llegaria un dia en que la ciencia daria con procedimientos capaces de sujetar dichos gases á la ley comun. Segun veremos en el capítulo siguiente, este dia ha llegado en efecto; todos los gases, sin excepcion, han sido liquidados y hasta solidificados; y por consiguiente todos son vapores, así como todos los vapores son gases.

Las nociones sobre unos y otros eran mucho más confusas un siglo atrás. Por ejemplo, aún no hace tanto tiempo como pudiera creerse que se sabe con exactitud lo que es el

vapor de agua, cuyas propiedades mecánicas se han utilizado ántes de conocerlo. La razon es muy sencilla: los descubrimientos enteramente modernos de los físicos y químicos sobre los gases no nos habian enseñado todavía que hay diferencias de constitucion entre las sustancias que toman el estado gaseoso ó aeriforme. Así es que se creia que el vapor era agua convertida en aire por la accion del fuego, ó bien aire ó cualquier otro flúido sutil que estaba primitivamente contenido en el agua. La *Enciclopedia* de D'Alembert y Diderot define la palabra *vapor* como sigue: «Es la reunion de una infinidad de burbujillas de agua ó de otras materias líquidas, llenas de aire enrarecido por el calor, y elevadas á la atmósfera hasta cierta altura á causa de su ligereza, despues de lo cual vuelven á caer, ya convertidas en lluvia, ya en rocío, ó ya en nieve, etc.» Como se ve, se confundia el vapor propiamente dicho, siempre invisible, con las nubes visibles, segun lo prueban además las líneas siguientes: «Las masas de esta reunion, que flotan en el aire, es lo que se llama *nubes*.»

Véase cómo se expresa acerca del mismo asunto Bossut, que escribia en 1755, es decir, á los ochenta años de la invencion de la máquina de vapor: «El fuego hace salir del agua, en forma de vapor, un flúido muy ligero, sutilísimo, muy elástico, y capaz de hacer equilibrio á pesos considerables..... Este vapor no es aire que se desprende del agua, como muchos podrian suponerlo.» En apoyo de esta afirmacion cita un experimento de Desaguliers, que es innecesario reproducir, y añade á modo de conclusion: «Parece que el vapor es un flúido particular, mezclado con el agua, ó si se quiere, con la parte más sutil del agua, puesta en accion por el fuego, y que pierde súbitamente su virtud expansiva, hasta no ocupar más que un volúmen infinitamente reducido cuando se le enfria de cualquier modo.»

La idea de que el vapor de agua no es otra cosa sino el agua misma trasformada en gas por la accion del calor no era muy clara todavía en aquella época; así se desprende de los párrafos que acabamos de trascribir. Pero de hoy más ya no cabe duda alguna sobre las circunstancias de esta trasformacion, conforme hemos podido ver en este capítulo.

Sin embargo, todavía hay muchas personas que no se forman una idea exacta de lo que es un vapor y confunden con él el producto de su condensacion. Para ellas, las nubes y las nieblas son vapores. El lenguaje comun autoriza sin duda esta confusion, pero por lo mismo importa más disiparla.

Las nubes, las nieblas, las brumas más ó ménos espesas ó ligeras son efectivamente producto de la evaporacion acuosa en la superficie del globo, de los continentes ó de los mares; pero no se las debe confundir con el vapor de agua en sí, que es siempre invisible en el aire. El vapor de agua es un gas de trasparencia perfecta, cuya acumulacion en la atmósfera no produce inmediatamente ninguna perturbacion. Cuando el agua de que se forma se hace visible en forma de nubes ó de nieblas, es que cierta cantidad de este vapor se ha condensado por cualquier causa, ha vuelto á pasar al estado líquido. En tiempo frio, el aliento de las personas y de los animales sale á modo de ligero rastro que se toma por vapor, como la blanca humareda que brota á bocanadas de la chimenea de una locomotora. Esta idea es falsa, lo repetimos; procede de una locucion inexacta. En todos los ejemplos que acabamos de citar, es el vapor de agua el que ha dado orígen á la nube más ó ménos blanca y más ó ménos opaca que se forma; pero á decir verdad, lo que en realidad no se ve es el vapor, el cual consiste en la reunion de una multitud de gotitas muy finas, de tenuísimas partículas de agua, que á veces se evaporan de nuevo, y á veces se reunen, se condensan más, caen convertidas en lluvia más ó ménos fina, cuando cada una de ellas ha adquirido el peso suficiente para vencer la resistencia del aire que hasta entónces las ha soportado. ¿Por qué, cuando se calienta agua en una vasija, sale vaho alrededor de la tapadera? ¿No es este el fenómeno mismo de la evaporacion, que sigue al de la vaporizacion propiamente dicha, no bien se ha llegado á la temperatura de la ebullicion? Sí, pero esas nubes que se elevan desde la superficie del agua no son ya vapor; al atravesar este las capas que pesan sobre la vasija y que son más frias que el agua, se condensa inmediatamente á causa del enfriamiento que experimenta; en virtud de su fuerza expansiva se difunde por el espacio circundante, y su extraordinaria disemina-

cion lo hace invisible en él. Pero entónces se puede observar el depósito de gotitas húmedas en los cuerpos vecinos, y más especialmente en la cara interior de la tapadera, donde se van acumulando hasta formar gotas más gruesas que chorrean por ella.

Las anteriores observaciones son de gran importancia para la explicacion é inteligencia de los fenómenos meteorológicos, segun tendremos ocasion de ver más adelante; y esta es la razon de que hayamos insistido tanto acerca de este punto.

CAPÍTULO IX

CAMBIOS DE ESTADO DE LOS CUERPOS — CONDENSACION DE LOS VAPORES. LIQUEFACCION DE LOS GASES.

I

PASO DE LOS CUERPOS AL ESTADO LÍQUIDO. — SUBLIMACION: CONDENSACION

En el capítulo anterior hemos visto qué condiciones se requieren para que un vapor recobre en parte ó en su totalidad el estado líquido que tenia ántes de formarse. Si el espacio que ocupa está saturado, cualquier enfriamiento puede precipitar ó condensar cierta cantidad de vapor; si no lo está, habrá que empezar por enfriarle lo bastante para producir la saturacion relativamente á la cantidad de vapor que contiene; y un nuevo descenso de temperatura originará entónces la condensacion apetecida. Tambien se puede devolver su estado líquido á un vapor saturado, por compresion, es decir, disminuyendo su volúmen. Los dos medios, el del descenso de temperatura y el de compresion, cada uno de los cuales basta cuando se trata de un vapor propiamente dicho, se pueden emplear separadamente, segun hemos visto al describir los experimentos fundamentales de Dalton; si se hace uso de ellos simultáneamente, la precipitacion de los vapores es naturalmente más abundante y rápida.

El paso de un líquido al estado gaseoso, por evaporacion ó vaporizacion, requiere la absorcion de cierta cantidad de calor, que se ha convenido en llamar *calor latente* de vaporizacion, porque, almacenado por decirlo así en el vapor producido, y necesario para mantener el estado gaseoso, no se manifiesta de un modo perceptible en el termómetro. Pero en la trasformacion inversa, esto es, en la vuelta del vapor al estado líquido, este calor aparece de nuevo, y más adelante veremos que la cantidad que resulta de la liquefaccion de un peso dado de vapor, es exactamente igual al que habia exigido el acto mismo de la vaporizacion. En una palabra, las leyes de la condensacion de los vapores son inversas de las que rigen para su formacion, y lo que decimos aquí de los vapores es igualmente aplicable á los gases, á los que debemos considerar como vapores más ó ménos distantes de su punto de saturacion.

La precipitacion del vapor de agua en el aire por efecto del enfriamiento es uno de los fenómenos más frecuentes y fáciles de observar (á lo ménos en sus efectos) de cuantos nos ofrece la atmósfera ambiente; la causa principal del rocío, las nieblas y las nubes es la condensacion del vapor de agua contenido en el aire producida por un descenso de temperatura bajo el punto de saturacion. En los capítulos de esta obra consagrados á la Meteorología volveremos á ocuparnos de estos fenómenos.

Hemos visto que ciertos cuerpos sólidos se trasforman directamente en vapor sin pasar por el estado líquido. Enfriando por medio de procedimientos á propósito los vapores de estos cuerpos ó de otros licuados, se les puede tambien volver á su estado primitivo, el sólido, sin que se licuen, dándose el nombre comun de *sublimacion* á la doble operacion que acabamos de definir. La ventaja que resulta de esta vuelta directa del vapor al estado sólido está en que se pueden obtener hermosos cristales del cuerpo que se experimenta. Véanse, segun Schutzenberger, algunos ejemplos de este sistema de

cristalizacion, que da muy buenos resultados con respecto á las sustancias que tienen una tension de vapor apreciable á poca distancia sobre ó bajo su punto de fusion:

«Para conseguir buenos cristales, dice, es

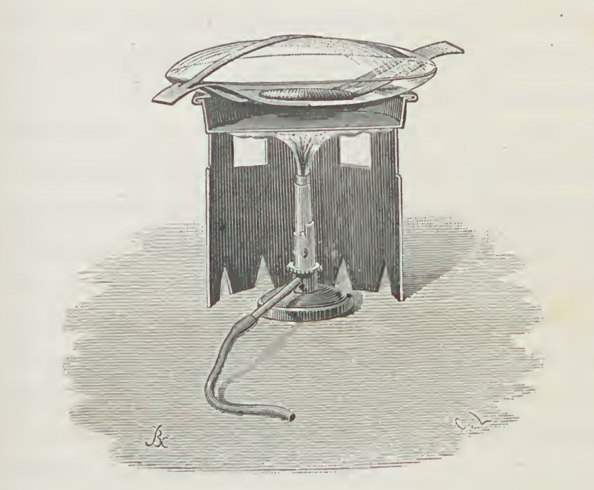


Fig. 82.—Aparato para la sublimacion de pequeñas cantidades de materia

preciso hacer de modo que se renueven y mantengan constantemente los vapores en un recinto, una parte de cuyas paredes conserva una temperatura inferior al punto de liquefaccion. Cuanto más lento sea el fenómeno, mayores serán los cristales obtenidos. Las condiciones que se han de llenar son las siguientes: un compartimiento del recinto contiene el cuerpo sólido ó derretido que ha de servir de generador de vapores, conservándolo á una temperatura tan baja como sea posible, aunque suficiente para producir una volatilizacion lenta y continua. Los vapores se difunden, y al tropezar con las paredes más frias de otra parte del recinto, se condensan en ellas en forma de cristales que sirven de centros de atraccion para los vapores renovados de continuo.

»Cuando el cuerpo tiene una tension de vapor apreciable á la temperatura ambiente, basta una leve desigualdad de temperatura de un punto á otro de las paredes de la vasija para producir el trasporte. Así por ejemplo, el alcanfor, el iodo y el protocloruro de iodo, colocados en un frasco que tenga una de sus caras vuelta hácia una ventana, se subliman poco á poco y forman depósitos cristalinos en esta cara, si la temperatura exterior es más baja que la de la habitacion.

»Para la sublimacion de pequeñas cantidades de materia, se hace uso de dos cristales de reloj del mismo diámetro cuyos bordes (fig. 82) se aplican exactamente uno sobre otro, y se mantienen sujetos con una hoja de talco ú oropel con dos cortes á propósito. Pónese la sustancia en el cristal inferior, el cual descansa sobre un disco anular. Calentando suavemente la parte inferior con un baño de arena ó de aire caliente, se trasporta toda la materia volátil al cristal superior, que se tapiza interiormente de cristales. Tambien se puede hacer esta operacion en un pequeño crisol de porcelana tapado con su tapadera y una hoja de papel de filtro, y calentado con un baño de arena. De este modo se sublima muy bien la alizarina, la antracena, la antraquinona y otros varios cuerpos de punto de fusion elevado y próximo al de volatilizacion.

»El aparato de la fig. 83 sirve para la sublimacion de la naftalina, del ácido benzóico, etc., en grande escala. Consiste en una marmita de hierro tapada con un cono de carton ó de papel, en cuyas paredes internas se depositan los cristales. Si se desea evitar los productos



Fig. 83.—Sublimacion del ácido benzoico y de la naftalina

aceitosos que suelen desprenderse de toda materia impura, basta tapar además la marmita con un papel de filtro poroso, pegándola á sus paredes. Tambien se efectúa la sublimacion en un frasco de fondo plano, en una retorta cuya par-

te inferior se calienta; los cristales se depositan en la parte superior ó en el gollete.»

Hay sustancias fijas, como el teluro, á las que no se puede sublimar directamente; pero se logra volatilizarlas haciendo pasar sobre el cuerpo convenientemente calentado una corriente gaseosa que no ejerza en él ninguna accion química. Segun los casos se emplean al efecto el ácido carbónico, el vapor de agua sobrecalentado y el hidrógeno. Para el teluro, se dirige una corriente lenta al través de un tubo de porcelana calentado al rojo, dentro del cual se coloca el cuerpo en un recipiente, y los cristales de teluro se depositan en las paredes de la parte fria del tubo.

II

LIQUEFACCION DE LOS GASES

En su notable *Memoria sobre la formacion y constitucion de la atmósfera* emitia Lavoisier la hipótesis de que un enfriamiento á propósito podria condensar el aire, ó cuando ménos una parte de las sustancias aeriformes que lo constituyen, hasta el punto de hacerlas pasar al estado líquido. A los pocos años de haber enunciado esta idea el gran químico, el amoniaco estaba liquidado. Por una parte, Guyton de Morveau conseguia este resultado bajando á —49° la temperatura de una redoma llena de dicho gas, merced á una mezcla de nieve y cloruro de calcio. Por otra parte, habiendo comprimido Van Marum á muchas atmósferas, y bajo el recipiente de una máquina de compresion, el gas amoniaco contenido en una probeta puesta sobre mercurio, vió que este líquido subia por ella llenándola enteramente. Lo que comunica un interés particular á estas dos primeras tentativas de liquefaccion de los gases es que cada una de ellas nos proporciona un ejemplo de la aplicacion de los dos métodos capaces de resolver el problema; el enfriamiento del gas y su compresion.

Mas á quien corresponde el honor de los primeros trabajos hechos por este concepto, es á Faraday. El sabio físico inglés habia obtenido ya en 1823 los siguientes gases en estado líquido: cloro, ácido sulfúrico, ácido sulfhídrico, óxido de cloro, ácido carbónico, amoniaco, protóxido de ázoe y cianógeno. Del mismo modo liquidó el ácido clorhídrico Davy, quien, segun parece, habia sugerido á su discípulo y preparador el experimento que dió el cloro líquido (1).

El método de Faraday era tan sencillo como el aparato de que se servia, pero los experimentos exigian grandes precauciones, y á causa del riesgo que ofrecian las explosiones y las fracturas de las vasijas, cuidaba de ponerse guantes y de taparse el rostro con una careta para operar. Introducia en un tubo doblado en forma de V al revés las sustancias propias para dar orígen al gas que se proponia liquidar (2), las reunia en el extremo tapado y cerraba el otro extremo á la lámpara. Calentando luégo la parte del tubo que contenia las materias introducidas, en tanto que la otra parte estaba metida en una mezcla frigorífica, el gas se desprendia; su tension iba aumentando, y tan luégo como pasaba de la tension máximum correspondiente á la temperatura de la parte fria, empezaba la

(1) Hé aquí cómo refiere Tyndall este caso en su notable obra titulada *Faraday inventor:* «En los ratos de ocio que le permitian sus ocupaciones, Faraday se proponia siempre á sí mismo asuntos de estudio y de investigacion. Así fué cómo, en la primavera de 1823, dió principio al estudio de una sustancia que hasta entónces se habia tomado por cloro sólido, pero en la cual habia reconocido Davy en 1810 un hidrato de cloro, es decir, un compuesto de cloro y de agua. Faraday analizó este hidrato y escribió una nota sobre su composicion, la cual leyó Davy, quien le aconsejó que calentara su hidrato bajo presion en un tubo sellado de vidrio. Hízolo así, y el hidrato entró en fusion á la temperatura de la sangre, el tubo se llenó de un gas amarillo y se vió que contenia dos líquidos. El doctor Paris entró por casualidad en el laboratorio miéntras Faraday estaba operando, y habiendo visto el líquido aceitoso en el tubo, mofóse del jóven químico por el poco cuidado que ponia en limpiar sus instrumentos. Cuando Faraday limó la punta del tubo, el contenido estalló y la materia aceitosa desapareció. A la mañana siguiente, el doctor Paris recibió estas dos líneas: «Muy Sr. mio: el *aceite* que vió V. ayer era decididamente cloro líquido.—Suyo afectísimo, M. Faraday.» El gas se habia liquidado bajo su propia presion. Faraday probó en seguida la compresion con una bomba, y logró tambien obtener cloro líquido.

»Davy añadió esta nota al acta que se publicó de este experimento: «Al aconsejar á M. Faraday que calentara el hidrato de cloro en un »tubo cerrado, supuse que sucederia una de tres cosas; que se liquida»ria en estado de hidrato, ó que se descompondria el agua ó que el »cloro se separaria en estado líquido.» Además, Davy aplicó inmediatamente el método de compresion de los gases por sí mismos á la liquefaccion del ácido clorhídrico. Faraday prosiguió sus experimentos y consiguió liquidar cierto número de gases clasificados hasta entónces entre los permanentes. En 1814, emprendió de nuevo este trabajo y ensanchó considerablemente sus límites.»

(2) Por ejemplo, calentando ácido sulfúrico anhidro y mercurio, Faraday obtenia el gas sulfuroso; para el ácido sulfúrico, ponia sulfuro de antimonio y ácido clorhídrico; el carbonato de amoniaco y el ácido sulfúrico le daban ácido carbónico; la descomposicion del nitrato de amoniaco bien seco, protóxido de ázoe; el cianuro de mercurio bien seco, cianógeno; el cloruro amoniacal de plata, amoniaco; el amoniaco y el ácido sulfúrico, ácido clorhídrico, etc. El grado de temperatura á la que era preciso elevar la parte calentada del tubo y el de frio á que estaba sometida la parte opuesta, variaban naturalmente segun la naturaleza del gas que se habia de producir ó de las sustancias empleadas con tal objeto.

condensacion, y el gas liquidado se acumulaba en el extremo sumergido en la mezcla frigorífica. Faraday medía la presion del gas con un pequeño manómetro de aire, préviamente graduado é introducido en el tubo. La densidad del líquido se medía aproximadamente con bolitas de vidrio, cuyo grado de penetracion en líquidos de densidades diferentes se habia comprobado de antemano.

Seis años ántes de que Faraday hiciera el importante descubrimiento de la liquefaccion de los gases, Despretz habia conseguido liquidar la euclorina, haciendo pasar el gas seco por un tubo de vidrio rodeado de una mezcla frigorífica expuesta á un calor suave; este líquido, de color verdoso, habia producido una detonacion como la de un tiro de fusil, quedando hecho añicos el tubo que lo contenia.

En 1824, Bussy obtuvo ácido sulfuroso líquido, á la presion normal, con una mezcla frigorífica cuya temperatura era de —10°. La figura 84 representa el aparato tal como se le dispone para reproducir el experimento en las cátedras. En la redoma que se ve á la izquierda se pone el ácido sulfúrico y el metal (mercurio por lo comun) que se calienta para hacer que se desprenda el gas. Este pasa primeramente á un frasco lavador y á una probeta que contiene cloruro de calcio. Seco y purificado así, va á parar á un tubo en forma de U metido en una mezcla frigorífica (hielo y sal marina ó cloruro de calcio), donde se enfria, condensa y liquida. De allí se le recoge en un globo metido tambien en una mezcla frigorífica. Por lo comun se le conserva en tubos cerrados á la lámpara ó en botellas parecidas á las que sirven para el agua de Seltz; como á la temperatura de + 15 á 20° la tension del gas sólo es de 2 á 3 atmósferas, la resistencia de las vasijas de que hablamos es muy suficiente para que no haya que temer rotura alguna.

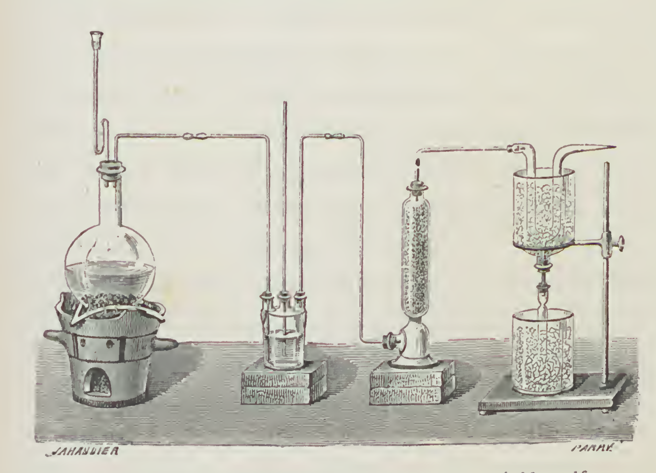


Fig. 84.— Aparato de Bussy para la liquefaccion del ácido sulfuroso.

Habiéndose utilizado los gases liquidados, y en especial el ácido carbónico, para producir grandes descensos de temperatura, ha habido que discurrir procedimientos á propósito para obtenerlos en regulares cantidades y aparatos de solidez excepcional. Thilorier inventó en 1835 el aparato que, modificado convenientemente, sirve todavía para producir ácido carbónico líquido.

Este aparato se compone de dos partes principales. La primera es el *generador*, vasija herméticamente cerrada, en la que se forma el gas ácido carbónico por la reaccion del sulfúrico sobre el bicarbonato de sosa. La segunda parte, el *recipiente* ó *receptor*, es una vasija semejante á la primera, á la que pasa el ácido carbónico por vía de destilacion y en la cual puede acumularse el producto de una serie de operaciones sucesivas.

En un principio, las paredes de estas vasijas eran de hierro fundido muy gruesas, pero el terrible accidente que costó la vida á Hervy (1) hizo proscribir el uso de este metal peligroso, y se le sustituyó con cobre forrado interiormente de plomo para evitar la accion del ácido sulfúrico. Esta especie de calderas, cuya forma es la de cilindros terminados en casquetes esféricos, están rodeadas de zunchos y flejes de hierro forjado, con lo cual se ha dado á los dos aparatos, generador y receptor, una seguridad á toda prueba. Uno y otro están cerrados con tapones de tornillo horadados en el sentido de sus ejes, y provistos de tubos de llave RR, que pueden comunicar entre sí por otro tubo de cobre *t*. Los dos recipientes están suspendidos entre las puntas de soportes de palastro, lo

(1) «El 29 de diciembre de 1840 se habia preparado el experimento de Thilorier para una leccion de química en la Escuela de Farmacia de Paris, y Hervy, preparador de la cátedra, se habia quedado solo junto al aparato. De pronto resonó una formidable detonacion, y habiendo acudido los profesores, que estaban en una habitacion contigua, encontraron al desdichado jóven tendido en el suelo y mutilado por los fragmentos del recipiente que habia cedido á la enorme presion del gas desprendido Trasportado Hervy al hospital despues de este percance, hubo de sufrir la amputacion de ambas piernas, mas á pesar de los cuidados que se le prodigaron, murió á los tres dias.» (P. Deleveau, *La materia y sus trasformaciones.*)

cual permite hacerlos oscilar alrededor de un eje horizontal, disposicion necesaria únicamente para el cilindro que se emplea como generador.

Cuando se quiere hacer una preparacion de ácido carbónico líquido con el aparato Thilorier, se quita el tapon del generador, y se introducen en él 1800 gramos de bicarbonato de sosa con 4^{lit},5 de agua á 35° ó 40°, y luégo una vasija cilíndrica con un kilógramo de ácido sulfúrico concentrado. Este cilindro, que descansa por una punta en el fondo y en el eje del generador, permanece vertical miéntras este lo está, de suerte que no hay contacto alguno entre el ácido y el bicarbonato de sosa *m*. Apretando entónces el tapon y cerrando la llave de comunicacion con el tubo *t*, se inclina el generador de modo que se le haga perder la direccion horizontal. En virtud de este movimiento de báscula repetido muchas veces, el ácido se esparce sobre la sal, y la reaccion se manifiesta instantáneamente.

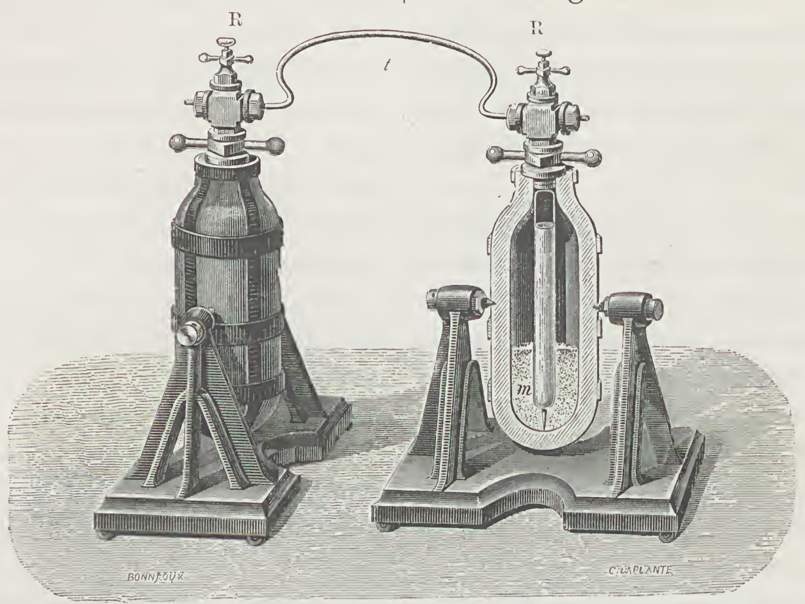


Fig. 85.—Aparato de Thilorier para la liquefaccion en grande del ácido carbónico

Por lo regular bastan diez minutos á lo sumo para el desprendimiento completo del gas. Entónces se abren las llaves, y el ácido carbónico, cuya tension llega en el generador hasta 75 atmósferas (para una temperatura de 30°), se precipita en el receptor, donde se condensa en virtud de la diferencia de temperatura y por consiguiente de la de tensiones. Si el receptor está á 15°, como la tension máximum del ácido carbónico á esta temperatura es de 50 atmósferas, la diferencia será de 25. Así es que basta un minuto para que la destilacion del gas producido sea completa y para que el gas del generador haya pasado al estado líquido en el receptor.

Haciendo cinco ó seis veces esta operacion, se reunen fácilmente dos litros de ácido carbónico líquido. El receptor está pues en gran parte lleno de este último, sobre el cual pesa una atmósfera gaseosa de una tension de 50 atmósferas. Si se abre entónces la llave, el líquido sale con gran violencia al exterior; la corriente gaseosa que de ello resulta produce un considerable descenso de temperatura; una parte del líquido se solidifica á causa de este frio intenso, y sobre el paso del chorro se ve una nubecilla blanca. Se puede recoger ácido carbónico sólido en forma de nieve vedijosa, con una caja de construccion especial que Thilorier unia á su aparato. Compónese de dos partes separadas que encajan fácilmente una en otra, teniendo cada cual un mango forrado de paño para evitar el contacto de las paredes metálicas extraordinariamente frias. La caja se ajusta mediante un tubo á una pieza de la llave del receptor, y cuando se abre esta, el chorro de ácido carbónico líquido penetra en la caja, da contra una lengüeta, se evapora en parte y se solidifica el resto, á una temperatura de —78°. Bajo su forma sólida ó de nieve vedijosa, el ácido carbónico tiene muy poca conductibilidad y gracias á esto, se le puede conservar más tiempo que en estado líquido. Se le puede tener en la mano sin inconveniente, á causa de la corriente gaseosa que

de él se desprende é impide el contacto (del mismo modo que el vapor en el fenómeno de calefaccion); pero si se le comprime contra la piel haciendo el contacto íntimo, se experimenta una sensacion dolorosa parecida á la que causa una quemadura, y la piel conserva señales de desorganizacion como las producidas por esta.

En 1861, Loir y Drion obtuvieron ácido carbónico á la presion de la atmósfera. Hé aquí cómo procedian estos físicos: «Si se introduce amoniaco en una redoma de vidrio, y se pone el interior de esta redoma en comunicacion con una buena máquina neumática por medio de una vasija que contenga coke impregnado de ácido sulfúrico, la temperatura del líquido baja rápidamente á los primeros movimientos del émbolo. Este líquido empieza á solidificarse á los —81°; en breve se congela en masa, y si con la máquina neumática se puede reducir la presion hasta un milímetro de mercurio próximamente, la temperatura del amoniaco sólido baja todavía algunos grados y llega á —89°,5. Este límite basta para producir la liquefaccion del ácido carbónico á la presion de la atmósfera; haciendo pasar una corriente de gas carbónico seco por un tubito en forma de U metido en el amoniaco, hemos visto que el gas se liquidaba en efecto; pero como la temperatura obtenida es inferior en pocos grados á la que corresponde á la saturacion, no se obtiene más que una liquefaccion escasa.»

Haciendo intervenir en el mismo experimento, oportunamente modificado, una presion de 3 á 4 atmósferas, da en muy poco tiempo grandes cantidades de ácido carbónico sólido. Prodúcese el gas calentando bicarbonato de sosa bien seco en un matraz de cobre rojo, y pasa por un tubo cerrado á una campana invertida llena de amoniaco que se enfria como ántes por la evaporacion en el vacío. Un manómetro de aire comprimido marca la tension del gas en el matraz y en el tubo. Al poco rato se ven aparecer en las paredes del tubo que penetra en el amoniaco cristales trasparentes cuya masa aumenta con rapidez, llegando al cabo de una hora á unos 25 gramos. «El ácido carbónico sólido obtenido en las condiciones que hemos dado á conocer, dicen Drion y Loir, se presenta en forma de masa incolora, con la trasparencia del hielo. Se la desprende fácilmente de las paredes del tubo condensador con una varilla de vidrio, y entónces se divide en gruesos cristales de apariencia cúbica y de 3 á 4 milímetros de lado. Estos cristales, puestos al aire libre, recobran poco á poco el estado gaseoso; se evaporan sin dejar residuo alguno. Si se les pone en la mano, no se experimenta ninguna sensacion de calor ni de frio; cuesta trabajo cogerlos con los dedos, pues á la menor presion se escapan como si estuviesen envueltos en una materia eminentemente untuosa. Cuando se consigue sujetar uno de ellos entre el pulgar y el índice, no tarda en producir una quemadura insoportable.»

El ácido carbónico nevoso, mezclado con un líquido que no se combine químicamente con él, como el éter, sufre una evaporacion muy rápida, á causa del aumento de conductibilidad que le da el líquido interpuesto: la sustancia pastosa así formada constituye una mezcla frigorífica de gran energía. Bajo el recipiente de la máquina neumática su evaporacion es todavía más rápida, pudiéndose bajar tambien la temperatura á —100°. Con esta mezcla se congela en pocos minutos un kilógramo de mercurio, y metiendo en ella un tubo herméticamente cerrado lleno de ácido carbónico líquido, se solidifica éste en forma de masa vítrea perfectamente trasparente.

Antes de pasar á la descripcion de los experimentos recientes que han puesto término á la demostracion, tan felizmente comenzada por Faraday, de la posibilidad de liquidar los gases tenidos hasta entónces por permanentes, digamos una palabra acerca del aparato construido en 1844 por M. Natterer, ilustrado profesor de la universidad de Viena. Con este aparato, cuya seccion está representada en la figura 86, se pueden comprimir mecánicamente los gases en un recipiente donde se liquidan en virtud de la doble influencia de la presion y del enfriamiento. Basta una simple ojeada á la figura para comprender cómo funciona el aparato. En una vasija que contenga una mezcla de hielo y sal se introduce un recipiente metálico de paredes gruesas en forma de pera prolongada, que comunica por su parte inferior con un largo cuerpo de bomba cilíndrico en el cual funciona un émbulo macizo; el orificio de comunicacion tiene una válvula que se abre de abajo arriba. El gas llega por un tubo lateral, y el juego de

la bomba lo rechaza al recipiente. Un ancho manguito por el cual se hace pasar una corriente de agua fria absorbe el calor desprendido por la compresion en el cilindro.

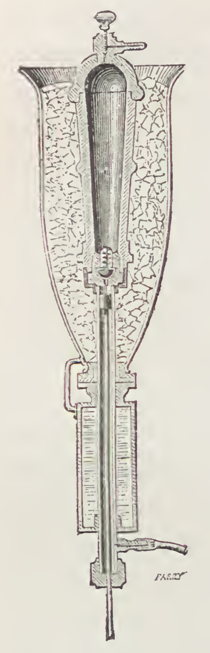


Fig. 86. — Aparato de Natterer para la compresion y la liquefaccion de los gases

M. Natterer ha liquidado así el ácido carbónico y el protóxido de ázoe.

Todos los gases de que hemos hablado hasta ahora forman líquidos incoloros, excepto el cloro que da un líquido amarillo aceitoso. Acabamos de ver que el ácido sulfuroso se solidifica á —79°; entónces presenta el aspecto de copos blancos cristalinos. El ácido sulfhídrico se solidifica tambien á —85°,5 formando una masa trasparente; el cianógeno á —40°, formándola radiada y cristalina de aspecto de hielo; por último, el protóxido de ázoe toma tambien el estado sólido á 100 grados bajo cero. Pero aún no se ha podido solidificar el cloro ni el ácido clorhídrico.

Terminemos este artículo continuando algunas cantidades que expresan las tensiones de vapor de algunos gases con la temperatura de liquefaccion correspondiente:

Gases	Temperatura de liquefaccion	Presion en atmósferas
Acido sulfuroso. . . .	— 10°	1
—	0°	1,5
—	+ 20°	3,5
Acido sulfhídrico. . . .	— 74°	1
— . . .	— 50°	2
— . . .	— 1°,1	9,9
— . . .	+ 11°,1	14,6
Acido clorhídrico. . .	0°	26,2
— . . .	+ 4°,4	30,7
Protóxido de ázoe. . .	— 87°	1,
— . . .	— 40°	8,7
— . . .	+ 1°,5	33,4
Amoniaco.	— 35°,7	1
— . .	0°	4,4
— . . .	+ 16°	7
Cianógeno.	— 22°	1
— . . .	0°	2,2
Cloro.	0°	6,5
— entre — 34°,5 y	— 50°	1
Acido carbónico. . . .	— 59°,4	4,6
— . . .	— 15°	24,7
— . . .	0°	38,5
— . . .	+ 10°	42
— . .	+ 31°	74

Dos cosas llaman la atencion en este cuadro; la tension considerable de los vapores de estos gases liquidados, á bajas temperaturas, y la rapidez con que dichas tensiones crecen cuando sube la temperatura. En los artículos siguientes completaremos estas breves nociones.

III

PUNTO CRITICO: HIPÓTESIS DE LA CONTINUIDAD DE LOS ESTADOS DE LA MATERIA

A pesar de los esfuerzos hechos por varios físicos y no obstante los poderosos medios que tenian á su disposicion para tratar de hacer pasar algunos gases al estado líquido (1), estos parecian incoercibles y resistian á todas las tentativas hechas para conseguir dicho cambio de estado. Si teóricamente era ya cierto, gracias á los resultados anteriormente obtenidos, que se deben considerar todos los gases como vapores más ó ménos distantes del punto en que la cohesion de sus moléculas se sobrepone á su fuerza elástica llegada á su límite, por lo ménos en la práctica parecia imposible poder llegar á dicho punto, ni áun combinando los procedimientos de compresion y de enfriamiento. Estos gases refractarios eran todavía seis en 1877, á saber: el oxígeno, el nitrógeno ó ázoe, el hidrógeno, el óxido de carbono, el hidrógeno protocarbonado y el bióxido de ázoe.

Sin embargo, algo se habia adelantado en el asunto, gracias á las investigaciones y á los experimentos de algunos sabios y de los cuales vamos á dar una idea.

Cagniard de Latour habia observado ya en 1822 que no siempre hay transicion brusca entre el estado líquido y el gaseoso de un mismo cuerpo. Habiendo echado sucesivamente agua, éter sulfúrico y alcohol en tubos de vidrio de paredes resistentes, de modo que sólo llenaran una parte de cada tubo, y soldándolos en seguida á la lámpara, los calentó á fuego lento y observó los fenómenos siguientes. El líquido empezaba por dilatarse, y al llegar á cierto lí-

(1) M. Natterer ha hecho experimentos sobre la compresion de los gases hasta la enorme presion de 2790 atmósferas. En 1861, M. Andrews ha sometido el oxígeno, el hidrógeno, el nitrógeno y el óxido de carbono á presiones superiores á todas las empleadas hasta entónces, exponiendo estos gases al frio producido por una mezcla de ácido carbónico y éter. «Ninguno de estos gases habia presentado el menor asomo de liquefaccion, dice; y sin embargo, los efectos reunidos del enfriamiento y de la compresion los reducian á un $^{8}/_{100}$ y aún ménos de su volúmen normal.»

mite de temperatura en que la capacidad del tubo distaba mucho de estar llena, se reducia totalmente á vapor, sin dejar rastro alguno de líquido. Este fenómeno tenia lugar, con el éter, á la temperatura de 200° y á una presion de 37 á 38 atmósferas; el espacio ocupado por el vapor no era doble que el del volúmen del líquido. Respecto del alcohol, la temperatura límite era 259°, la presion igual á 109 atmósferas y el volúmen del vapor apénas el triple del del líquido. Finalmente, el agua, á una temperatura poco diferente de la de fusion del zinc (450°), se reducia enteramente á vapor en un espacio que no llegaba á cuatro veces su volúmen en estado líquido.

Thomas Andrews, individuo de la sociedad real de Lóndres, empezó en 1861 una serie de estudios sobre las condiciones de presion y de temperatura que caracterizan el paso del estado líquido al gaseoso. Dicho físico dió cuenta en los siguientes términos de los primeros resultados de sus trabajos que han venido á completar en su conjunto los de Cagniard de Latour: «Si se liquida parcialmente ácido carbónico por la sola accion de la presion, y se eleva al mismo tiempo su temperatura hasta 88° F. (31° centígrados), vese la superficie de separacion entre el líquido y el gas, como si estuviera indecisa, perdiendo poco á poco su curvatura, hasta desaparecer completamente. La capacidad del aparato se llena entónces de un flúido homogéneo que manifiesta, cuando se disminuye bruscamente la presion ó se baja ligeramente la temperatura, apariencias de estrías móviles, que ondulan al través de toda su masa. Si la temperatura se eleva á más de 88° F, la liquefaccion aparente del ácido carbónico, es decir, la separacion de esta sustancia en dos estados distintos, se hace imposible, áun apelando á presiones de 300 á 400 atmósferas. El protóxido de ázoe da resultados análogos.»

Parecia pues que, al ménos para el gas ácido carbónico, habia un límite de temperatura más allá del cual no se puede ya liquidar el gas por simple compresion. Mas T. Andrews ha hecho extensivo el estudio de esta particularidad tan interesante á otros gases para los cuales ha encontrado tambien un límite parecido, y ha dado el nombre de *punto crítico* á esta temperatura que varía de una sustancia á otra.

Para estudiar la ley de la compresibilidad de los gases cuando se hace variar la presion y la temperatura, el sabio físico inglés se ha valido de un aparato cuyo modo de funcionar se comprenderá examinando la figura 87. El gas perfectamente seco y purgado de aire estaba metido en un tubo de paredes gruesas y de diámetro capilar cerrado por un extremo; una pequeña columna de mercurio lo aislaba del extremo abierto del tubo, que, en esta mitad de su longitud, tenia doble diámetro que la otra. El tubo estaba cuidadosamente graduado en partes de capacidad igual en toda su longitud, de modo que á todo momento se podia medir el volúmen del gas con rigurosa exactitud. Luégo se le metia en otro tubo de cobre guarnecido de dos monturas de tornillo, una de las cuales daba paso á la parte capilar del tubo de vidrio, al paso que la otra llevaba un tornillo de acero. Las monturas y el tornillo estaban acondicionados de modo que impedian todo escape de gas, áun á las mayores presiones. Llenábase de agua el aparato ántes de atornillarlo, y se obtenia la presion haciendo penetrar en ella el tornillo de acero; la presion se comunicaba al gas por medio de la columna móvil de mercurio.

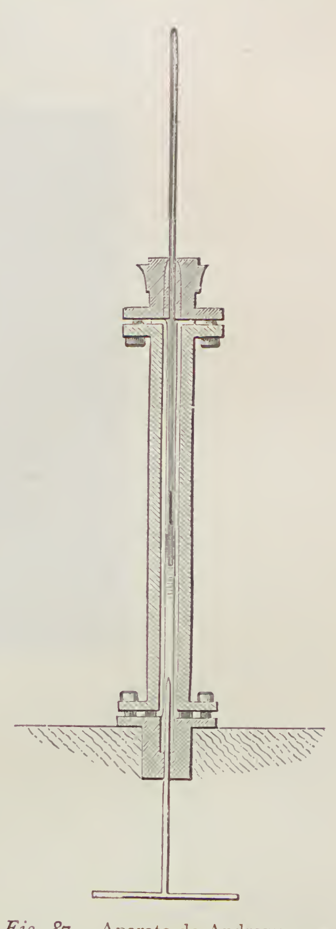


Fig. 87.—Aparato de Andrews para el estudio de la compresibilidad de los gases

Para hacer un experimento, rodeaba la parte capilar del tubo de un manguito rectangular de laton cuyas dos caras opuestas estaban formadas de cristales trasparentes; y una corriente de agua que pasaba de continuo por el manguito permitia mantener el gas á la temperatura que se quisiera. El cuerpo del aparato estaba

metido en una vasija exterior de cobre llena de agua á la temperatura ambiente.

M. Andrews ha representado con curvas los resultados de sus experimentos: echando una ojeada sobre la figura 88 en que están trazadas estas curvas por lo que respecta al ácido carbónico y al aire, se comprenderá fácilmente su carácter. Las abscisas de estas curvas representan las presiones en atmósferas, y las ordenadas son los volúmenes correspondientes del gas á una temperatura determinada, siendo el volúmen inicial el mismo para cada temperatura especial.

Debajo del punto crítico, es decir, de la temperatura de 30°,9, las curvas se acercan el eje de las x más rápidamente que las del aire, hasta el momento en que se llega á la presion que corresponde al punto de liquefaccion, donde se ve una repentina disminucion de las ordenadas, es decir, del volúmen del gas. Para las temperaturas superiores al punto crítico, pero aún próximas á él, el volúmen disminuye primeramente con bastante regularidad, y luégo sufre una depresion brusca, seguida de una disminucion más lenta; pero la depresion es cada vez ménos marcada á medida que la temperatura aumenta, pudiéndose ver que no existe ya en la curva que da los resultados obtenidos á 48°. M. Andrews no ha hecho experimentos más allá de esta temperatura; pero, como dice muy bien, claro está que miéntras se eleve, la curva debe continuar acercándose á la que representa los cambios de volúmen de un gas perfecto.

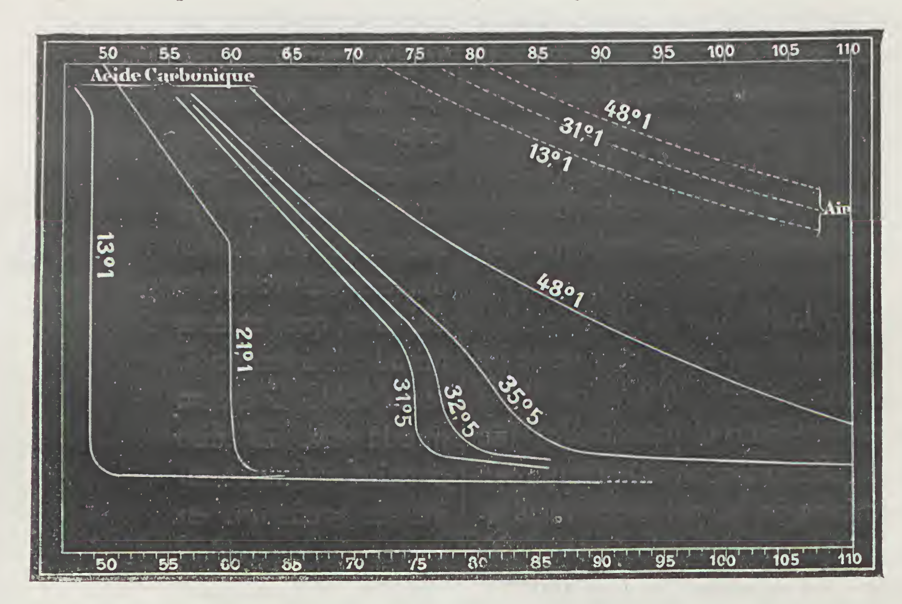


Fig. 88.—Curvas de compresibilidad del gas ácido carbónico y del aire á varias temperaturas, segun Andrews

La conclusion que este sabio físico ha deducido de tan notables experimentos es que la transicion entre el estado gaseoso y el estado líquido de un mismo cuerpo puede efectuarse de un modo por decirlo así insensible, y que en ciertas condiciones de presion y de temperatura, los caracteres de ambos estados no son bastante marcados para que no se los pueda confundir. «Los estados gaseoso y líquido ordinarios no son en el fondo, segun M. Andrews, más que formas ampliamente separadas de un mismo estado de la materia, y pueden pasar de uno á otro por una serie de graduaciones tan lentas que el tránsito no presenta en punto alguno interrupcion ni solucion de continuidad. Desde el ácido carbónico, gas perfecto, hasta el ácido carbónico, líquido perfecto, la transicion puede efectuarse por un procedimiento continuo; el gas y el líquido no son más que términos distantes de una larga serie de cambios físicos continuos. Verdad es que, mediante ciertas condiciones de temperatura y de presion, el ácido carbónico se halla en lo que pudiera describirse como un estado de instabilidad, y pasa bruscamente, con desarrollo de calor y sin aplicacion de presion adicional ó cambio de temperatura, al volúmen que únicamente hubiera podido adquirir siguiendo el largo y tortuoso camino de un procedimiento continuo. En el cambio rápido que entónces sobreviene, se manifiesta una diferencia marcada, miéntras se produce el fenómeno, entre los ca-

racteres ópticos y las demás propiedades físicas del ácido carbónico que ha quedado reducido al menor volúmen, y los del ácido carbónico aún no trasformado; así pues, no hay dificultad en este caso en hacer la distincion entre el líquido y el gas. Pero en otros casos esta distincion es imposible; y en muchas de las condiciones que he descrito se trataria en vano de asignar al ácido carbónico el estado líquido más bien que el gaseoso.»

Con todo, los recientes experimentos hechos por el físico inglés Hannay parecen invalidar estas conclusiones. Segun este sabio, «la continuidad de los estados líquido y gaseoso enunciados por M. Andrews es tan sólo aparente;» un crecido número de experimentos le induce á afirmar que «cualquiera que sea el grado de presion, el estado líquido cesa á la temperatura crítica presentándose entónces el gaseoso.»

La consideracion del punto crítico ha deparado á M. Andrews un medio de definir con más precision la diferencia que se debe establecer entre un gas y un vapor. En su concepto, esta distincion se ha basado en principios puramente arbitrarios. Llámase *vapor* al éter en estado gaseoso, al paso que el ácido sulfuroso en el mismo estado lleva el nombre de *gas*, y sin embargo ambos son vapores emanados, el primero de un líquido que hierve á +35°, y el segundo de otro líquido que hierve á —10°. Por consiguiente, la distincion no está fundada sino en una condicion puramente relativa, la posicion del punto de ebullicion encima ó debajo de la temperatura ordinaria; carece, pues, de valor científico. «El punto crítico de temperatura, dice, nos proporciona un criterio para distinguir un gas de un vapor, si se considera importante conservar esta distincion. Muchas de las propiedades de los vapores dependen de la presencia simultánea del gas y del líquido en mutuo contacto; pero ya hemos visto que esta presencia simultánea no puede existir sino cuando la temperatura está debajo de su punto crítico. Podemos pues definir un vapor diciendo que es un gas á cualquier temperatura debajo de su punto crítico. En virtud de esta definicion, todo vapor puede trasformarse en líquido por efecto de la presion solamente; pero esta no puede liquidar un gas hasta convertirlo en un líquido visible, que se distinga de *su* gas por una superficie de separacion. Si se acepta esta definicion, el ácido carbónico será un vapor bajo 31°, y un gas sobre esta temperatura; el éter será lo primero bajo 200°, y lo segundo á mayor temperatura.»

Comparando estas deducciones, sugeridas por experimentos positivos, con las observaciones de Thilorier sobre la gran dilatacion del ácido carbónico líquido, con las indagaciones de Drion sobre el rápido aumento de la dilatacion de los líquidos volátiles á la par de la temperatura, y con los experimentos de Natterer sobre la compresibilidad de los gases que decrece á medida que aumenta la presion, nos vemos inducidos á tenerlas por exactas, y si la continuidad de los estados de la materia es aún un punto dudoso y controvertido, no sucede lo mismo con la existencia del punto crítico, cuya consideracion ha adquirido una importancia real despues de los trabajos de M. Andrews, por cuanto ha demostrado claramente á los experimentadores la causa del malogro de sus tentativas para liquidar los últimos gases permanentes. Las enormes presiones á que se habia sometido á los gases eran insuficientes, porque por baja que fuese la temperatura, excedia aún á la de sus puntos críticos. Los enérgicos medios de enfriamiento que proporcionaban ciertas mezclas frigoríficas, como el ácido carbónico y el éter, no eran bastante poderosos para que la compresion pudiera ocasionar el paso al estado líquido. Era preciso encontrar otro nuevo medio de bajar la temperatura, problema que hace pocos años ha sido resuelto simultáneamente mediante dos procedimientos distintos, discurridos por monsieur Cailletet y M. Raoul Pictet respectivamente.

IV

LIQUEFACCION DE LOS ÚLTIMOS GASES LLAMADOS PERMANENTES

En el mes de noviembre de 1877, el físico francés Cailletet, conocido hacia mucho tiempo por sus estudios sobre la compresibilidad de los gases, anunciaba á la Academia francesa que acababa de liquidar la acetilena. «El aparato que uso, dice, y que puede servir tambien para la liquefaccion de un gran número de gases, se compone de un cilindro hueco de acero, especie de probeta invertida, y de paredes bastante

gruesas para resistir la presion de muchos centenares de atmósferas. En la parte superior del aparato hay una rosca á la que se puede sujetar, con una tuerca de bronce, el recipiente de vidrio que contiene el gas que se ha de liquidar. Este recipiente consiste en un tubo grueso y de escaso diámetro, soldado á otro tubo más ancho que penetra en el mercurio de que está lleno el cilindro hueco.

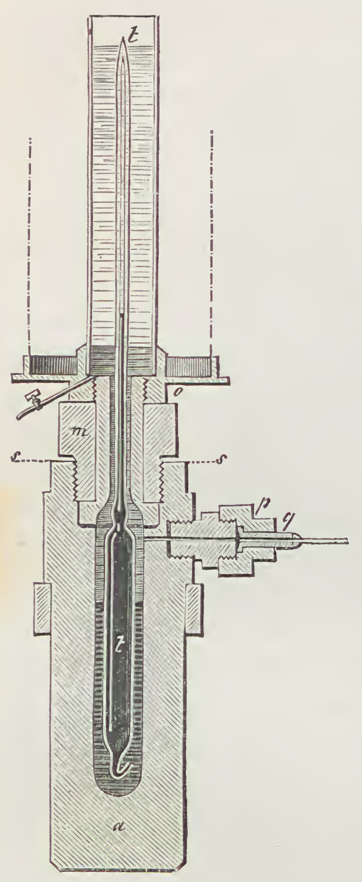


Fig. 89.—Seccion del aparato compresor de M. Cailletet

»Así pues, la probeta está sometida interior y exteriormente á presiones iguales, lo cual permite darle dimensiones notables, no obstante las altas presiones que habrá de soportar; en cuanto al tubo de pequeño diámetro puesto sobre ella, está tambien sometido interiormente á presiones que producen la liquefaccion, al paso que sus paredes exteriores soportan únicamente la presion atmosférica. Un apéndice de metal da paso al tubo de reducido diámetro que está adherido á él con masilla, y que se eleva verticalmente, lo cual permite observar á la simple vista todas las fases de la liquefaccion; para mayor seguridad conviene introducir esta parte del aparato en un cilindro más ancho lleno de agua.

»Se comprime el gas con una bomba hidráulica por medio de una capa de mercurio.»

M. Cailletet sometió la acetilena á una presion de 83 atmósferas á la temperatura de + 18° y vió que se formaban muchas gotitas las cuales corrian por las paredes inferiores del tubo. El líquido, enfriado á 0°, se trasformó en un compuesto blanco, de apariencia de nieve, el cual se deshacia desprendiendo numerosas burbujas de gas cuando se le calentaba ligeramente ó se cambiaba la presion. El hidruro de etilena se liquidó del mismo modo á 46 atmósferas y á + 4°.

Esto sólo era el preludio de resultados más decisivos. Y en efecto, apénas habia trascurrido un mes desde esta comunicacion á la Academia de Ciencias, cuando M. Cailletet lograba liquidar el bióxido de ázoe, comprimiéndolo á 104 atmósferas y á la temperatura de —11°. A + 8°, este cuerpo habia permanecido gaseoso á la presion de 270 atmósferas. Al dar parte M. Berthelot de este resultado á la Academia de ciencias, se expresaba en los siguientes términos acerca de esta nueva conquista de la ciencia. «Este descubrimiento es de importancia excepcional por cuanto ha hecho adelantar á la ciencia más allá del límite á que habia llegado hace cincuenta años Faraday, el cual consiguió liquidar gases permanentes. Hasta ahora no se habia logrado liquidar ninguno de los gases que obedecen á la ley de Mariotte, cuando se hallan cerca de la presion normal, á pesar de las tentativas reiteradas de los experimentadores más hábiles. Yo mismo habia comprimido varios de aquellos hasta 800 atmósferas, pero sin resultado. En estos últimos años, M. Andrews nos ha demostrado la razon de esta impotencia, refiriendo las propiedades de los gases no liquidables á las de los líquidos que se vaporizan enteramente, pero sin cambiar de volúmen. Para cada vapor, dice Andrews, hay un *punto crítico* más allá del cual no es posible volver el vapor al estado líquido con ninguna presion, por grande que esta sea. Los experimentos de M. Cailletet prueban que este punto crítico se halla situado entre + 8° y —11° para el bióxido de ázoe. Me parece muy probable que la mayoría de los gases no liquidados hasta el presente, como el oxígeno, que se aparta ya de la ley de Mariotte á grandes presiones, y el óxido de carbono, no resistirán á los nuevos procedimientos que M. Cailletet pone por obra con tan feliz éxito.»

Hay que añadir que el formeno puro, comprimido á 180 atmósferas á 7°, habia dado nacimiento á una niebla que aparecia tan luégo como tenia lugar una disminucion brusca de presion. M. Cailletet realizó la prediccion de M. Berthelot aprovechando el enfriamiento considerable originado por dicha disminucion sú-

bita. Vamos á ver ahora que el oxígeno, el nitrógeno, el hidrógeno y el óxido de carbono han cedido al empleo de este medio.

En la sesion celebrada el 24 de diciembre de 1877, sesion que será memorable en la historia de la ciencia, se presentaron simultáneamente dos comunicaciones sobre tan importante asunto. M. Cailletet anunciaba la liquefaccion del oxígeno y la del óxido de carbono, y M. Raoul Pictet dirigia desde Ginebra al Presidente de la Academia el lacónico despacho siguiente: «Oxígeno liquidado hoy (22 de diciembre) á 300 atmósferas y 140° de frio con ácidos sulfuroso y carbónico mezclados.» Los experimentos de Cailletet habian precedido en algunos dias á los del sabio ginebrino, de suerte que le pertenece incontestablemente la prioridad, pero segun hizo observar M. Sainte Claire Deville, «no por eso pierde su mérito el notable trabajo de Raoul Pictet,» por cuanto los medios operatorios de ambos físicos eran enteramente diferentes, conforme veremos al describir los aparatos de Pictet.

Cailletet recurrió tambien á la disminucion

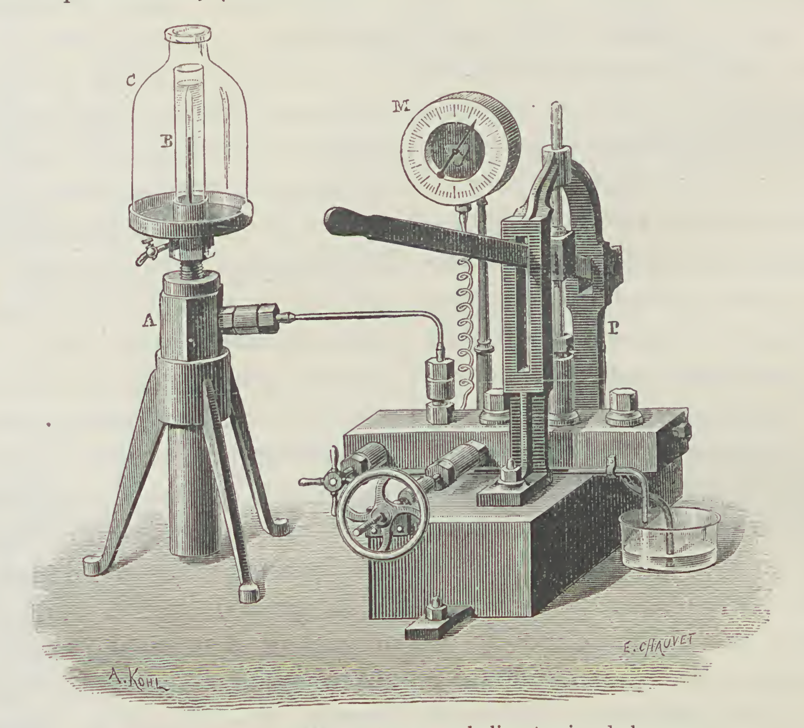


Fig. 90.—Aparato de M. Cailletet para la liquefaccion de los gases

brusca de la compresion á fin de obtener el descenso de temperatura necesario para la liquefaccion. El oxígeno y el óxido de carbono comprimidos á 300 atmósferas, á —29° (frio producido con el ácido sulfuroso), habian conservado su estado gaseoso. «Pero si se los distiende súbitamente, lo cual debia producir, segun la fórmula de Poisson, una temperatura de 200 grados lo ménos bajo el punto de partida, vése aparecer inmediatamente una niebla intensa, causada por la liquefaccion y quizás por la solidificacion del oxígeno ó del óxido de carbono. Esta niebla se produce respecto del oxígeno, áun cuando este gas se halle á la temperatura ordinaria, con tal que no se le dé tiempo de perder el calor que adquiere por el solo hecho de la compresion.»

En iguales condiciones de temperatura y de presion, Cailletet no pudo obtener al principio nada del hidrógeno, pues ni la distension más rápida le dió indicio alguno de materia nebulosa. Al poco tiempo logró liquidar el ázoe, luégo el hidrógeno, y por fin el aire, cuya liquefaccion no podia ya ofrecer dudas toda vez que los dos gases que lo constituyen habian sido liquidados separadamente. Hé aquí algunos detalles de estos nuevos resultados. El ázoe puro y seco, súbitamente distendido, se condensa del modo más marcado en el tubo de experimentos de M. Cailletet á + 13° y á 200 atmósferas de presion. «Al principio aparece, dice éste, una materia semejante á un líquido pulverizado, unas gotitas de volúmen apreciable; despues desaparece poco á poco este líquido trasladándose de las paredes al centro del tubo, y por último forma una especie de columna vertical en direc-

cion del eje del mismo tubo. La duracion total del fenómeno es de unos tres segundos.»

El hidrógeno puro, comprimido á 280 atmósferas y en seguida bruscamente distendido, dió «una niebla sumamente fina y sutil, en suspension en toda la longitud del gas y que desaparecia de repente.» Segun Berthelot, que fué testigo de estos interesantes experimentos juntamente con Sainte-Claire Deville y Mascart, la liquefaccion del hidrógeno no ofrecia dudas, áun cuando las señales de ella no fuesen tan completas ni tan fáciles de apreciar como las del ázoe. Lo que segun el citado físico, cuya opinion es de tanto valer, da á los experimentos de Cailletet «su verdadero carácter y su certidumbre propia, es que manifiestan y permiten comparar el gas *en un mismo estado trasparente y limitado, bajo sus tres estados sucesivos* de flúido elástico comprimido, de líquido pulverizado y de flúido en gran parte distendido. Agreguemos á esto la facilidad con que se puede repetir en seguida cada experimento, tantas veces como se quiera, á fin de reproducir y estudiar aisladamente las varias circunstancias del fenómeno.»

Acabamos de decir que M. Cailletet habia obtenido indicios de liquefaccion del aire. Pues un nuevo experimento le permitió asegurar que lo habia solidificado. Hé aquí los detalles de esta nueva trasformacion. «En el tubo de vidrio de mi aparato de presion, dice, he metido aire seco y purgado de ácido carbónico, y he enfriado con protóxido de ázoe la parte superior del tubo *solamente*. Cuando la presion ha sido de 200 atmósferas, he visto correr por las partes inferiores del tubo *filetes* líquidos sin duda alguna, que parecian muy agitados, efecto igual al que produce el éter al correr por un tubo. Cuando estos filetes llegaban á ponerse en contacto con el mercurio que se hallaba entónces á algunos centímetros debajo de la mezcla frigorífica, parecian retroceder en su camino. He seguido comprimiendo hasta el momento en que el mercurio iba á penetrar en el aparato frigorífico, punto que estaba ya muy frio, á juzgar por el depósito de hielo que se formaba en el tubo. La presion era de 255 atmósferas. Los filetes líquidos aumentaban sensiblemente y se hacian cada vez más visibles.

»Por último, he elevado la presion á 310 atmósferas. El mercurio se hallaba en contacto con la parte del tubo enfriada por el protóxido de ázoe: estaba congelado. Entónces he quitado de pronto el aparato frigorífico, y he visto la parte superior de la columna de mercurio cubierta de escarcha: era aire congelado. Por un instante me ha parecido ver un líquido, en el momento en que el mercurio iba á recobrar su estado líquido.»

¡Aire congelado! ¡Qué brillante justificacion de la prediccion de Lavoisier, mencionada en el decurso de este capítulo!

Ocupémonos ahora de los curiosos experimentos de M. Raoul Pictet.

El método adoptado por este físico consiste únicamente, como el de Cailletet, en la combinacion de los medios de condensacion empleados hasta entónces en todos los experimentos de liquefaccion; el descenso de la temperatura del gas que se ha de liquidar, y la accion simultánea de las más fuertes presiones. Evaporando ácido sulfuroso líquido en el vacío, Pictet obtiene un primer descenso de temperatura (de —65° ó —73°) que utiliza para preparar masas de ácido carbónico ó de protóxido de ázoe líquidos, á la presion de 4 á 6 atmósferas solamente. La evaporacion en el vacío de uno ú otro de estos gases liquidados produce un nuevo descenso de temperatura, merced al cual se obtiene un frio de —120° á —140° alrededor del tubo que contiene el gas sometido al experimento. Por último, la distension brusca de la alta presion del gas á la presion atmósferica agrega su influencia para bajar todavía más la temperatura y dar orígen á la liquefaccion y áun á la solidificacion. Tal es, en términos generales, la parte del método de M. Pictet que tiene por objeto someter el gas á un enfriamiento bastante grande para que la temperatura descienda debajo del punto crítico peculiar de este gas. En cuanto á la presion, no acude para ella á medios mecánicos; al producirse y desprenderse el gas en un espacio cerrado, bajo la accion del calor, se comprime por sí mismo.

Digamos ahora cómo se han dispuesto los aparatos propios para realizar las operaciones indicadas por el método que acabamos de resumir en sus caractéres esenciales. Estos aparatos, segun el autor mismo, debian reunir las condiciones siguientes para conseguir la liquefaccion de los gases permanentes: «1.° actuar sobre un

gas *absolutamente puro*, sin vestigio alguno de gas extraño; 2.º disponer de una compresion metódica de este gas, poder llegar á presiones enérgicas, y medirlas exactamente; 3.º disponer de las temperaturas más bajas que sea posible y poder mantenerlas indefinidamente, sustrayendo al propio tiempo calor á estas bajas temperaturas; 4.º contar con una gran superficie de condensacion mantenida á dichas temperaturas; 5.º poder utilizar la distension de los gases al pasar de la presion considerable á la atmosférica, distension que, agregándose á los medios precedentes, *obliga* á que resulte la liquefaccion.»

Esto sentado, describamos los aparatos y las operaciones necesarias para la liquefaccion del oxígeno por ejemplo, á cuyo fin seguiremos los detalles de las figs. 91 y 92, una de las cuales representa el plano, y la otra la elevacion de los aparatos de M. Pictet.

La preparacion del oxígeno se hace en la va-

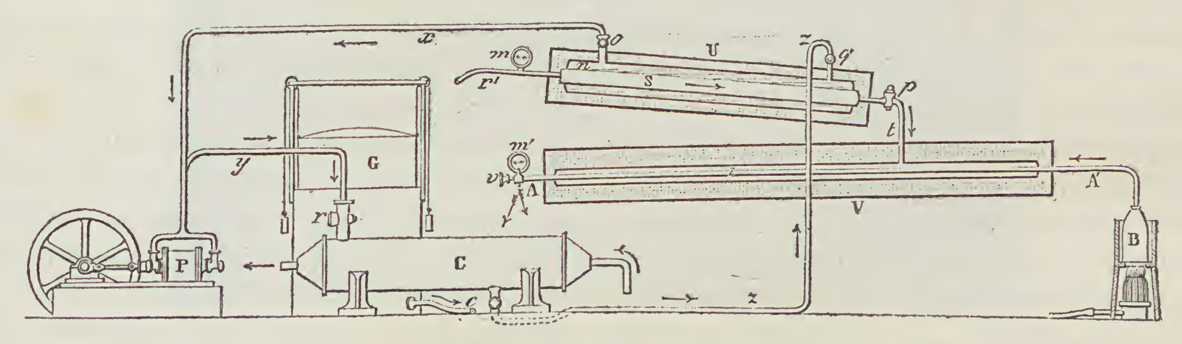


Fig. 91.—Aparatos Raoul Pictet. Elevacion

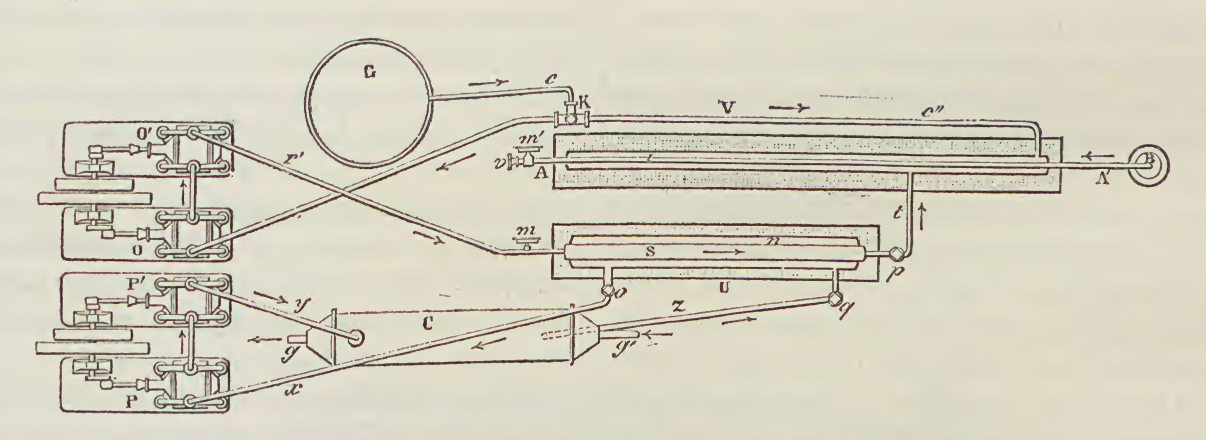


Fig. 92.—Plano de los aparatos de M. Raoul Pictet para la liquefaccion de los gases

sija B. Es un recipiente de hierro forjado de 1659 centímetros cúbicos de capacidad, y cuyas paredes tienen un espesor medio de 35 milímetros, capaces de resistir una presion de 1500 atmósferas. Introdúcese en él una mezcla de clorato de potasa y cloruro de potasio de peso conocido. Bajo el recipiente se pone entónces una corona de gas, como las que se emplean en los hornos Perrot. Encendiendo y regulando la llama, se calienta progresivamente el recipiente hasta los 485 ó 500 grados necesarios para que se desprenda por completo el oxígeno. El gas producido pasa del recipiente B á un tubo de cobre A, de poco más de 4 metros de longitud, 4 milímetros de diámetro interior y 15 de diámetro exterior, presentando así gran resistencia y considerable superficie.

En este tubo se comprime el oxígeno por su propia formacion. Un manómetro *m'*, adaptado á un orificio practicado cerca del extremo opuesto al recipiente, marca la medida directa de la presion del gas, estando graduado de modo que indica hasta 800 atmósferas. El tubo A que contiene el oxígeno, está rodeado, en algo más de los cuatro quintos de su longitud, de otro tubo *i* de mayor diámetro que recibe por el tubo *t* el ácido carbónico procedente del depósito S. El frio intenso producido por la evaporacion de este líquido es el que, bajando la temperatura del tubo A y del oxígeno que contiene, ocasio-

na la condensacion y liquefaccion de este gas.

Pero ¿cómo se ha producido el ácido carbónico líquido y en virtud de qué procedimiento se obtiene su evaporacion en el depósito S? Veámoslo. Hemos dicho que con la evaporacion del ácido sulfuroso se conseguia el descenso de temperatura necesario para liquidar el ácido carbónico. Con este objeto hay en una caja U, situada encima de otra caja V que contiene el tubo del oxígeno, un gran tubo *n*, que rodea el depósito S destinado á recibir el ácido carbónico líquido. A este tubo pasa el ácido sulfuroso; está provisto de otros dos tubos de comunicacion *z* y *x*, el primero de los cuales sirve para introducir el ácido sulfuroso líquido comprimido por una bomba P′ en el condensador de forma de caldera tubular C, y el segundo para hacer el vacío sobre el ácido sulfuroso del tubo *n* mediante el juego de otra bomba P acoplada á la primera. La asociacion de ambas bombas es tal que la aspiracion de la segunda se efectúa en el mismo momento que la compresion de la primera. El ácido sulfuroso que se evapora en el tubo *n* pasa por la llave *o*, de allí á la primera bomba P y luégo á la segunda que lo empuja por *y* al condensador. Aquí el vapor vuelve de nuevo al estado líquido. Como la llave de regulacion *q*, por donde se introduce el ácido sulfuroso líquido, está abierta de modo que da salida á una cantidad igual á la que se evapora por *o*, resulta que el nivel del líquido en el tubo *n* es constante. Vemos ya cómo, á consecuencia de esta evaporacion, ocurre alrededor del tubo S el primer descenso de temperatura á —65° ó —73° cuando más.

Un segundo sistema de bombas acopladas O y O′ sirve para condensar y evaporar el ácido sulfúrico. Fabrícase este gas en dos grandes bocales de vidrio llenos de fragmentos de mármol de Carrara, á los cuales se hace llegar ácido clorhídrico. El gas producido, lavado y secado con cloruro de calcio, pasa á un gasómetro G, donde lo aspiran las bombas O y O′ y se comprime en el tubo S, en donde se liquida fácilmente á causa de la baja temperatura ocasionada por la evaporacion del ácido sulfuroso. De este modo se pueden acumular 2 kilógramos en ménos de un cuarto de hora. Ya hemos visto cómo se introduce el ácido carbónico líquido por el conducto *t* en el largo tubo de que está rodeado el tubo de oxígeno. Cuando este está lleno, se da vuelta á una llave de tres vías K, y entónces tiene lugar la aspiracion de la bomba O, por los conductos *c* y *c″*, en la parte superior del tubo. Hácese el vacío en la superficie del ácido carbónico líquido, el cual se congela, resultando el segundo descenso de temperatura á —120° ó —130° alrededor del tubo que contiene el gas oxígeno.

En esta descripcion hemos hecho caso omiso de muchos detalles que en la práctica no carecen en verdad de importancia, pero que nos hubieran llevado más léjos de lo que se requiere para comprender los experimentos.

Digamos ahora, con referencia al autor mismo, los resultados conseguidos por él. El 22 de diciembre de 1877 efectuó el primer experimento decisivo que tenia por objeto la liquefaccion del oxígeno. Véanse sus diferentes fases: creemos que el lector seguirá con interés sus detalles, por cuanto hallará de nuevo en él las operaciones sucesivas ántes descritas y el órden en que deben ejecutarse:

«Las bombas empiezan á funcionar á las nueve de la mañana. La temperatura baja rápidamente en el tubo *n*.

»9ʰ 30ᵐ. La temperatura es —55°. Hago funcionar las bombas de ácido carbónico. El gasómetro desciende. Presion del ácido carbónico, 6 atmósferas. Durante la marcha sube poco á poco hasta 8 atmósferas.

»9ʰ 50ᵐ. La temperatura es —49°, la presion 8,5 atmósferas. Cierro la entrada del ácido carbónico en las bombas.

»10ʰ 20ᵐ. Temperatura —65°, presion 3,9 atmósferas. Vuelvo á dar entrada al gas, pero ligeramente.

»10ʰ 40ᵐ. Temperatura —60°, presion 5 atmósferas. Se han liquidado ya 800 litros de gas ácido carbónico. La parte inferior del manómetro *m′* de oxígeno está cubierta de escarcha.

»10ʰ 50ᵐ. Atornillo al recipiente el tubo A. El recipiente contiene 700 gramos de clorato de potasa mezclado con 250 de cloruro de potasio machacados juntamente, tamizados y perfectamente secos.

»11ʰ. Enciendo la corona de gas debajo del recipiente. El ácido carbónico penetra con más abundancia en las bombas. La presion sube á 10 atmósferas; temperatura —48°. Tengo al

seguridad de que todo el ácido carbónico ha pasado al tubo *i*, porque aparece la escarcha en el tubo *c''* que desemboca en lo alto del primero.

»$11^{h}\ 15^{m}$. Pongo en comunicacion el tubo *c''* con la aspiracion de las bombas, llegando la temperatura del ácido carbónico á un minimum —130°.

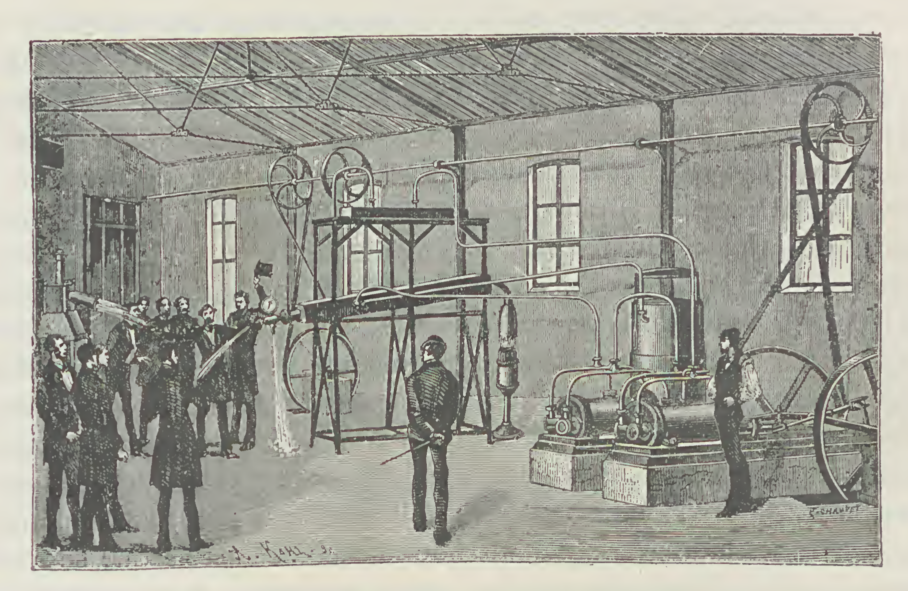


Fig. 93.—Liquefaccion del oxígeno por M. Raoul Pictet

»$11^{h}\ 33^{m}$. El manómetro del oxígeno indica un principio de presion, 5 atmósferas próximamente. El régimen de las dos circulaciones de ácido sulfuroso y de ácido carbónico queda perfectamente establecido.

»$12^{h}\ 10^{m}$. El manómetro de oxígeno marca 50 atmósferas.

»$12^{h}\ 16^{m}$. La presion sube á 60 atmósferas, y sigue elevándose progresivamente. (Llega al máximum de 526 atmósferas á las $12^{h}\ 42^{m}$, para bajar á 470 á la $1^{h}\ 10^{m}$ y permanece ya estacionada).»

En este momento, añade M. Pictet, quedan terminados todos los fenómenos físicos y quí-

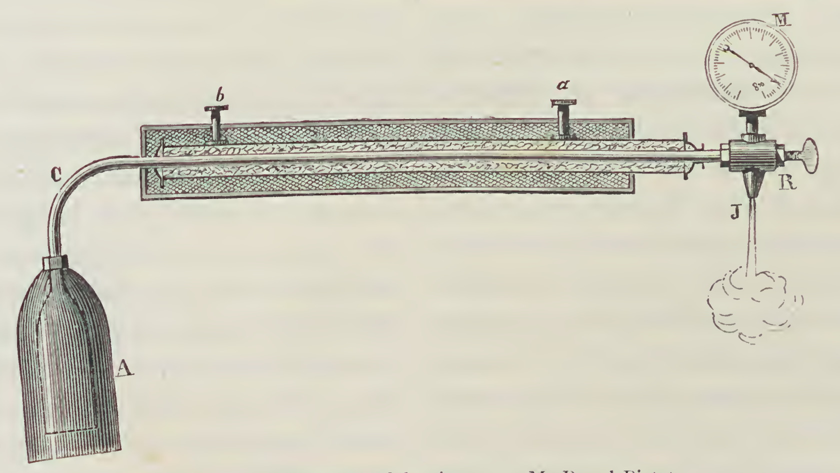


Fig. 94.—Liquefaccion del oxígeno por M. Raoul Pictet

micos del experimento, y toda la capacidad del tubo A está llena de oxígeno líquido. Para demostrarlo así, hace entónces actuar la distension abriendo la llave de tornillo R que cierra este tubo (figs. 93 y 94). «Un chorro líquido J sale con gran fuerza á la manera de penacho blanco y brillante, rodeado de una aureola azulada, sobre todo en la parte inferior. La longitud del penacho líquido es de unos 10 á 12 centímetros por un diámetro de 1,5 á 2. El chorro dura 3 ó 4 segundos próximamente.» Despues de cerrar la llave y de comprobar el descenso de presion á 352 atmósferas, en las que queda de nuevo estacionada unos 3 minutos, M. Pictet abrió otra vez la llave y salió un segundo chorro, semejante al primero. Despues el gas continuó

distendiéndose y no dió más que una densa niebla por su condensacion parcial. Examinando con la luz eléctrica condensada por un reflector la apariencia de los chorros en el orificio de salida, M. Pictet distinguió claramente en la vena flúida dos partes: una central, bastante diáfana, de 2 á 3 milímetros de diámetro; otra, blanca y brillante, que rodeaba á la primera y tenia de 10 á 15 milímetros. H. Dufour estudió esta luz blanca con un prisma de Nicol y percibió en ella indicios de polarizacion, lo que induce á creer, añade Pictet, «que el oxígeno se volatiliza al salir del tubo con tal energía que las partículas líquidas se trasforman en cristales sólidos, verdadero polvo de *oxígeno congelado.* El calor del aire ambiente trasforma de nuevo y casi instantáneamente estos cristales en gas.»

Hé aquí ahora los resultados obtenidos por el mismo físico con el gas hidrógeno, durante el mes de enero de 1878. Producíase el gas mediante la reaccion del formiato de potasa y de la potasa cáustica, calentados en el recipiente del aparato ántes descrito. En una carta de M. Raoul Pictet, dirigida en 11 de enero á M. Dumas, secretario perpetuo de la Academia de ciencias, se describe el experimento en estos términos:

«El hidrógeno se ha desprendido con perfecta regularidad. La presion ha llegado á 650 atmósferas ántes de permanecer estacionada. El desprendimiento del hidrógeno correspondia á 252 litros á cero. El frio era de —140° próximamente. Cuando abrí la llave de cierre, el hidrógeno líquido salió con fuerza por el orificio produciendo un sonido agudo á modo de silbido. El chorro era de color azul de acero y completamente opaco en una longitud de 12 centímetros. En el mismo momento se oyó en el suelo un ruido semejante al que produce la granalla al caer, y el silbido se trasformó en un zumbido muy particular, parecido al que hace el sodio cuando se le echa en el agua.

»Casi al punto, el chorro se hizo intermitente, y á cada salida se percibieron sacudidas en la llave. Durante este primer chorro bajó la presion de 650 atmósferas á 370. Despues de cerrar aquella, la presion bajó gradualmente por espacio de muchos minutos hasta 215 atmósferas, luégo subió poco á poco á 225, y allí se paró de nuevo. Volví á abrir la llave, pero el chorro salió con tal intermitencia que no era posible dudar de que se habia congelado el hidrógeno cuando hube detenido las bombas y la produccion del frio.»

Comprimiendo una mezcla de ozono y oxígeno, mantenida á —23° en el tubo capilar del aparato Cailletet, los Sres. Hautefeuille y Chapuis han observado en el tubo un color azul celeste, que pasa al añil cuando se aumenta la presion. Una brusca distension que sigue á una compresion de 75 atmósferas dió lugar á la formacion momentánea de una niebla, indicio manifiesto de congelacion y hasta de solidificacion. Mezclando con el oxígeno ozonizado gas ácido carbónico, obtuvieron los mismos operadores, á —23° y por efecto de una compresion lenta, un líquido separado del gas por un menisco visible. El color del gas era marcadamente azul, de lo cual dedujeron que se lo comunicaba el ozono liquidado. Los experimentos de dichos físicos datan del año 1880.

Tal es, en resúmen, el conjunto de los notables experimentos que han completado la demostracion de la posibilidad de liquidar todos los gases considerados hasta entónces como permanentes. A decir verdad, ni M. Cailletet ni M. Pictet han podido obtener el oxígeno, el nitrógeno y el hidrógeno en estado líquido en cantidad suficiente y durante un tiempo bastante largo para poder estudiar sus propiedades, bajo esta nueva forma, como se han estudiado, por ejemplo, las del ácido carbónico. Ambos los han obtenido en estado dinámico por decirlo así; pero se necesitaba tenerlos en estado estático como se ha conseguido respecto del ácido carbónico desde los trabajos de Faraday y Thilorier. Esta segunda parte de un problema que por espacio de tanto tiempo ha burlado los esfuerzos y las tentativas de los físicos, probablemente no es más difícil de resolver que la primera, dado el estado actual de la ciencia; ántes bien se puede esperar lo contrario.

Y en efecto, en el momento en que escribimos esto (mayo de 1883), parece que la ciencia está á punto de realizar esta nueva conquista, si es que no la ha realizado ya. Júzguese de ello por las notas que ha recibido la Academia en sus sesiones del 16 y 23 de abril de este mismo año. La primera es relativa á la liquefaccion del oxígeno y á la solidificacion del al-

cohol y del sulfuro de carbono; la segunda á la liquefaccion del nitrógeno.

Los experimentos se han hecho en Cracovia, en el laboratorio de M. Wroblewski y con la colaboracion de M. Olszewski. Conviene añadir que el primero de estos físicos habia presenciado los experimentos de M. Cailletet en Paris y familiarizádose con el manejo de sus aparatos. Hé aquí el tenor de la primera nota:

«Los curiosos trabajos de Cailletet y Raoul Pictet sobre la liquefaccion de los gases han permitido esperar que llegaria un dia en que se pudiera observar el oxígeno reducido al estado líquido en un tubo de vidrio, conforme se hace ahora con el ácido carbónico. La única condicion era obtener una temperatura suficientemente baja. M. Cailletet, en una nota publicada hace un año, ha recomendado la etilena liquidada como un medio para obtener un frio muy intenso. Este líquido, *á la presion de una atmósfera,* hierve á —105°C., si se mide la temperatura con un termómetro de sulfuro de carbono. Habiendo comprimido el oxígeno en un tubo poco capilar y enfriado en este líquido á —105°C., M. Cailletet ha observado en el momento de la distension «una ebullicion tumultuosa que persiste por espacio de un período apreciable y se parece al salto de un líquido á la parte enfriada del tubo. Esta ebullicion se forma á cierta distancia del fondo del tubo. No he podido reconocer, añade M. Cailletet, si este líquido preexiste ó si se forma en el momento de la distension, porque todavía no he podido ver el plano de separacion del gas y del líquido.»

«Habiendo aprovechado un nuevo aparato construido por uno de nosotros y con el cual se pueden poner cantidades de gas relativamente considerables á presiones de algunos centenares de atmósferas, nos hemos propuesto estudiar las temperaturas que presentan los gases durante la distension. Estos experimentos nos han conducido en breve al descubrimiento de una temperatura á la cual el sulfuro de carbono y el alcohol se congelan, y el oxígeno se liquida con gran facilidad. *Obtiénese esta temperatura hirviendo la etilena en el vacío.* La temperatura depende del grado de vacío obtenido; el mínimum que hemos podido conseguir hasta el presente es de —136°C., habiendo determinado esta temperatura, como todas las otras, con un termómetro de hidrógeno. La temperatura crítica del oxígeno es más baja que la en que hierve la etilena á la presion atmosférica. Esta última no es de —105°C., como se ha creido hasta ahora, sino que se halla entre —102° y —103°C., como lo hemos visto con nuestros termómetros.

»De una serie de experimentos que hemos practicado el 9 de abril, entresacamos como ejemplos las cifras siguientes:

Temperaturas	Presion en atmósferas á la cual ha empezado á liquidarse el oxígeno
—131°,6.	26,5
—133°,4.	24,8
—135°,8.	22,5

»El oxígeno líquido es incoloro y trasparente como el ácido carbónico, muy movible y forma un menisco marcado. El sulfuro de carbono se congela á los —116°C y se derrite á —110°C. El alcohol se pone viscoso como el aceite á —120°C, y solidificándose á —130°,5C, se trasforma en un cuerpo blanco.»

La segunda nota de los Sres. Wroblewski y Olszewski tiene por objeto la liquefaccion del ázoe, y está concebida en estos términos:

«Habiendo liquidado completamente el oxígeno, tratamos de hacer lo mismo con el ázoe. Este gas, enfriado en un tubo de vidrio hasta —136°C. y sometido á la presion de 150 atmósferas, no se liquida todavía, ni se nota nada en el tubo. Si se hace una *distension brusca,* sobreviene en todo el tubo una ebullicion tumultuosa, únicamente comparable con la del ácido carbónico líquido en un tubo de vidrio de Natterer, cuando se le sumerge en agua calentada á una temperatura algo superior á la crítica del ácido carbónico. Pero si se efectúa la distension poco á poco y si disminuyendo la presion no se la hace pasar de 50 atmósferas, el ázoe se liquida de una manera completa, presentando entónces el líquido un menisco bien distinto y evaporándose muy de prisa.

»Así pues, el ázoe sólo permanece unos cuantos segundos en el estado estático de los líquidos estables. Para poder mantenerlo más tiempo en tal estado, se deberia disponer de una temperatura inferior al mínimum que nos ha sido dable obtener hasta ahora con nuestro pro-

cedimiento. Nos hemos ocupado de buscar los medios de conseguir esta temperatura.

» El ázoe líquido es incoloro y trasparente como el oxígeno y como el ácido carbónico.»

Los mismos físicos han anunciado además la liquefaccion del óxido de carbono, liquefaccion efectuada en las mismas condiciones que la del ázoe, y que da un líquido incoloro con un menisco visible.

CAPÍTULO X

CALORIMETRÍA.—CALOR ESPECÍFICO DE LOS SÓLIDOS, LÍQUIDOS Y GASES

I

DESIGUAL CAPACIDAD DE LOS CUERPOS PARA RECIBIR EL CALOR

En las dos clases de fenómenos que hemos estudiado hasta ahora y que reconocen por causa las variaciones del calor en los cuerpos, ya se trate de cambios de volúmen ó de cambios de estado, el termómetro es el instrumento que nos ha servido para precisar las condiciones de estos cambios. Ora sea éste un termómetro de mercurio ó bien uno de aire, las indicaciones de su escala marcan las variaciones de su propio volúmen á partir de un punto arbitrario, y bastan perfectamente para definir la temperatura ó el estado de equilibrio que resulta ó tiende á resultar cuando se pone el instrumento en un medio más cálido ó más frio, es decir, de temperatura más elevada ó más baja que la del termómetro mismo. Pero compréndese bien, y ya hemos insistido acerca de este punto, que los grados del termómetro no dan la medida de las cantidades de calor absorbidas ó despreciadas en los fenómenos de variaciones de volúmen ó de cambios de estado, como tampoco la marcarian si en lugar de contarse estos grados á partir de un punto fijado arbitrariamente, tuvieran por punto de partida el cero absoluto.

Vamos á ver en efecto que la cantidad de calor absorbida ó desprendida para producir el aumento ó la disminucion de volúmen de un cuerpo, de cierto peso de una sustancia dada por ejemplo, no tan sólo depende de la variacion correspondiente de temperatura de este cuerpo, sino tambien de su peso, de la naturaleza de su sustancia y á veces de su temperatura inicial. Lo propio sucede con la cantidad de calor absorbida ó desprendida en los fenómenos de fusion ó de vaporizacion, y en los inversos de solidificacion ó liquefaccion.

Debe tenerse por evidente que la cantidad de calor necesaria para que se produzca un fenómeno es proporcional al peso del cuerpo en que dicho calor reside; que si un kilógramo de agua necesita una cantidad dada de calor para calentarse, por ejemplo, de 10° á 15°, 2, 3.... 10 kilógramos de agua exigirán 2, 3.... 10 veces más calor para pasar igualmente de 10° á 15° de temperatura. Así tambien, si el cuerpo vuelve á su temperatura primitiva, desprenderá precisamente todo el calor que habia absorbido. Débese asimismo tener por evidente que la cantidad de calor absorbida ó desprendida por un cuerpo de un peso determinado, cuando su temperatura sube ó baja cierto número de grados encima ó debajo de un punto dado, es igual á la que desprende ó absorbe cuando vuelve á esta temperatura primitiva. Por lo demás la experiencia confirma la exactitud de estos principios.

Pero ¿es tambien verdadero el segundo de ellos si se comparan las cantidades de calor absorbidas ó desprendidas á partir de temperaturas diferentes? Interroguemos para ello á la experiencia. En una vasija calentada á 25° se echa un kilógramo de agua á 0° y otro á 50°, y despues de agitar rápidamente la mezcla, se introduce en ella un termómetro: entónces se ve que la temperatura de la mezcla es de 25°. Así pues, el calor cedido por el kilógramo de agua á 50° al kilógramo á 0° ha bastado para elevar 25° la temperatura del segundo; al propio tiempo esta pérdida de calor experimentada por el primero ha sido causa de que baje la suya de 50° á 25°. Este experimento prueba en

definitiva que el calor necesario para elevar de 0° á 25° un peso de agua determinado, elevaria de 25° á 50° el mismo peso. La temperatura inicial no ejerce pues influencia en la cantidad de calor absorbida. Esto es cierto por lo que respecta al agua así como á algunos otros cuerpos; pero sólo en ciertos límites de temperatura que varian con los diferentes cuerpos, conforme tendremos ocasion de ver más adelante. Así por ejemplo, dos pesos iguales de mercurio, uno á 200° y otro á 0°, mezclados, dan dos kilógramos del mismo líquido, no ya á 100°, temperatura media entre las dos extremas, sino á 102°,85, temperatura superior á esta media. Más allá de 100°, el mercurio absorbe ó desprende más calor, para una misma variacion de temperatura, que á ménos de 100°.

Por último otro experimento demuestra que las cantidades de calor que acabamos de comparar varian con la naturaleza de las sustancias. Mezclemos separadamente un kilógramo de agua á 0° con el mismo peso de mercurio ó de esencia de trementina á 100°, ó introduzcamos en ella un kilógramo de cobre á 100°. Habrá, como ántes, adquisicion de calor por parte del agua y pérdida por la de las otras sustancias, siendo evidente que en cada experimento la ganancia será igual á la pérdida; pero en el primer caso la temperatura de la mezcla será 3°,2; en el segundo 30°, y en el tercero 8°,6. Vese pues que las cantidades de calor iguales distan mucho de producir la misma variacion de temperatura en pesos iguales de sustancias diferentes. Esto se expresa diciendo que cada sustancia tiene una *capacidad calorífica* ó un *calor específico* que le es propio.

Tyndall ha hecho un experimento bastante curioso y á propósito para patentizar la diferencia que existe entre los diversos cuerpos por lo que atañe á su capacidad para el calor. «Hé aquí por una parte, dice, una torta de cera de abejas de 15 centímetros de diámetro y 12 milímetros de espesor; y por otra una vasija con aceite á la temperatura de 180°. He introducido en el aceite caliente balas de distintos metales, de hierro, de plomo, de bismuto, de estaño y de cobre. Ahora todas tienen la misma temperatura ó sea la del aceite. Pues bien: las saco de este líquido y las pongo sobre esta torta de cera (fig. 95) que está sostenida en el aro de un soporte de retorta: derriten la cera y se hunden en ella, pero veo que unas se hunden más pronto que otras. El hierro y el cobre se implantan en la masa más vigorosamente que los otros metales: sígueles el estaño, quedando rezagados el plomo y el bismuto. El hierro atraviesa de parte á parte la cera y cae; el cobre le

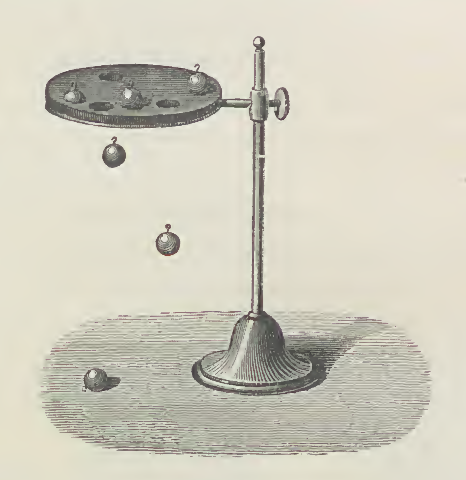


Fig. 95.—Experimento de Tyndall

sigue; el fondo de la bola de estaño asoma á la superficie inferior de la torta, pero sin poder ir más allá, miéntras que el plomo y el bismuto adelantan muy poco, por ser incapaces de hundirse hasta la mitad del espesor de la torta.»

Los experimentos referidos más arriba datan de mediados del siglo XVIII, siendo al escocés Black á quien le cabe el honor de haber sido el primero en efectuarlos. Tras él vinieron Wilcke, Crawfort, y luégo Lavoisier y Laplace, quedando fundada la importante rama de la ciencia del calor llamada CALORIMETRÍA.

Desde un principio hubo que elegir una unidad para medir cantidades de calor. Véase la definicion y el nombre universal adoptado para esta unidad.

Dase el nombre de *caloria* á la cantidad de calor necesaria para elevar de cero á 1 grado centígrado un kilógramo de agua destilada. Como acabamos de ver que respecto del agua entre 0° y 100° esta cantidad es constante cualquiera que sea la temperatura inicial, puede decirse en términos más generales que una caloria es una cantidad de calor absorbida ó desprendida por un kilógramo de agua destilada cuya temperatura se eleva ó baja 1 grado centesimal.

Si se toma el calor específico del agua por unidad, es claro que habrá que definir *el calor*

específico de un cuerpo cualquiera diciendo que es *el número de calorias absorbidas ó desprendidas* por un kilógramo de este cuerpo cuando su temperatura sube ó baja un grado. Así tambien se entenderá por *calor latente de fusion, de vaporizacion*, etc., el número de calorias que necesitará un kilógramo de cada sustancia para pasar del estado líquido al sólido, de este al de vapor, etc. En breve completaremos y precisaremos el valor de estas expresiones; pero basta lo que precede para hacer ver que la calorimetría debe dividirse en dos partes que correspondan á los procedimientos que tienen por objeto las dos cuestiones siguientes:

1.º Medir los *calores específicos* de los sólidos, líquidos y gases, es decir, las cantidades de calor absorbidas ó desprendidas en las variaciones de temperatura de las diferentes sustancias en dichos estados;

2.º Medir los *calores latentes*, ó valuar las cantidades de calor absorbidas ó desprendidas en los distintos cambios de estado de las mismas sustancias.

Empecemos por los calores específicos.

II

CALORES ESPECÍFICOS DE LOS CUERPOS SÓLIDOS Y LÍQUIDOS. — MÉTODOS DE LAS MEZCLAS, DEL CALORÍMETRO DE HIELO Y DEL ENFRIAMIENTO

Los experimentos de Black anteriormente mencionados le proporcionaron el principio de un método para medir calores específicos, método llamado *de las mezclas*. Consiste en tomar un peso dado del cuerpo cuyo calor específico se desea averigar y cuya temperatura en el momento del experimento se conoce, y en sumergirlo en una masa de agua de peso y temperatura tambien conocidos. Al cabo de cierto tiempo, el cuerpo y el agua adquieren una temperatura comun, perdiendo el uno cierta cantidad de calor que es indudablemente igual á la absorbida por el otro. La ecuacion que se debe formar para resolver el problema es de las más sencillas. En el primer miembro tendríamos el peso P del cuerpo multiplicado por la incógnita, es decir, por el número de calorias que requiere un kilógramo para variar 1º, y por el número de grados que ha bajado la temperatura primitiva T para llegar á la temperatura comun θ. Este primer miembro será pues Px $(T—\theta)$. En el segundo, si p es el peso del agua y t su temperatura inicial, tendremos p $(\theta—t)$, puesto que á cada grado de elevacion de temperatura corresponde una caloria, ó lo que es lo mismo, puesto que se toma por unidad el calor específico del agua. Así pues tendremos:

$$Px\,(T-\theta)=p\,(\theta-t);\ \text{de donde}\ x=\frac{p\,(\ \ -t)}{P\,(T-\theta)}$$

Pero en realidad la solucion no es tan sencilla, porque no puede hacerse el experimento sin que haya causas de error dimanadas de varias circunstancias accesorias, circunstancias que son relativas á los cambios de calor que tienen necesariamente lugar entre los dos cuerpos sometidos al experimento y al medio ambiente. Enumeremos estas varias causas de error.

La vasija que contiene el agua y que lleva el nombre de *calorímetro*, el termómetro que sirve para medir la temperatura de la mezcla, y el agitador de que se hace uso para uniformar esta temperatura, se caldean á costa de la mezcla; lo propio sucede con los soportes de la vasija; por otra parte, el cuerpo suele estar colocado en una envolvente sólida que se sumerge con él en el calorímetro y que en virtud de su propio enfriamiento, participa del caldeo del agua del calorímetro. Por último, tambien hay pérdidas de calor ocasionadas por la conductibilidad y la radiacion. Sin entrar en todos los detalles de un experimento, diremos cómo se procede para evitar en lo posible las causas de error.

La vasija del calorímetro es un cilindro de laton ó de plata perfectamente bruñido, muy delgado, y sostenido con hebras de seda sujetas á soportes para evitar las pérdidas de calor por conductibilidad. Caliéntase el cuerpo en un baño, y se le pasa rápidamente al agua de un calorímetro, suspendiéndolo de un hilo muy delgado. Agítase el agua con una varilla de vidrio y se observa el termómetro, que sube al pronto quedando luégo estacionado.

El método, discurrido por Wilke y que adquirió celebridad á causa de los experimentos de Laplace y Lavoisier quienes lo perfeccionaron notablemente, es el del *pozo* ó *calorímetro de hielo*. Este método se basa en el conocimiento del número de calorias necesarias para fundir un kilógramo de hielo, ó en el del calor latente de fusion del hielo. Segun veremos en breve,

se ha averiguado que este calor es de 79,25 calorias, es decir, que la cantidad del calor absorbido por un kilógramo de hielo que se funde bastaria para elevar á la temperatura de 1 grado 79,25 kilógramos de agua á 0°, ó lo que es lo mismo para elevar de 0° á 79,25 un kilógramo de agua. O tambien, cuando se funde un kilógramo de hielo á 0° en otro de agua á 79°,25, los dos kilógramos de agua que resultan de la fusion están á la temperatura de 0°. Conociendo este resultado se podrá medir el calor específico de un cuerpo investigando experimentalmente el peso de hielo que este cuerpo seria capaz de fundir bajando su propia temperatura á 0°. Hé aquí cómo se procede:

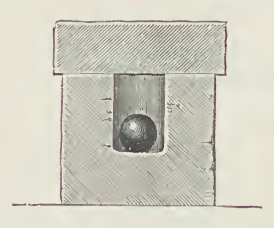


Fig. 96.—Medida del calor específico de los cuerpos. Método del pozo de hielo.

En un pedazo de hielo, bien compacto y homogéneo, se abre una cavidad cuyas paredes se enjugan con cuidado, introduciendo en seguida en ella la sustancia cuyo calor específico se desea averiguar, y cuya temperatura, superior á 0°, se conoce; y luégo se pone sobre la cara bien plana del pedazo de hielo una gruesa placa de hielo tambien que le sirve de tapadera (fig. 96). Al enfriarse el cuerpo, funde una porcion del hielo con el cual está en contacto; se recoge el agua de fusion y se la pesa. Supongamos que el resultado es 100 gramos ó la décima parte de un kilógramo; claro está que el calor total desprendido por el cuerpo para bajar á 0°, ha sido la décima parte de 79,25 calorias, ó sea 7,925. Por hipótesis, el cuerpo pesaba 2 kilógramos, y estaba al principio á 34°,75 de temperatura: dividiendo 7,925 por 34,75, y luégo por 2, se tendrá la cantidad de calor desprendido por 1 kilógramo para una variacion de 1°, es decir, el calor específico del cuerpo. En el caso particular que acabamos de elegir, el resultado seria 0,114, que es el calor específico del hierro.

Aparte de la dificultad de proporcionarse pedazos de hielo bastante gruesos, el procedimiento del pozo de hielo ofrece una causa de error difícil de apreciar; no se sabe si la temperatura interior del hielo es inferior á cero. Por esto se usa con preferencia el *calorímetro de hielo* ideado en 1780 por Laplace y Lavoisier, y representado en corte y elevacion en la figura 97. Es un aparato compuesto de tres vasijas concéntricas entre las cuales se ponen fragmentos de hielo y éste machacado. El cuerpo caliente se coloca en la vasija menor que es de tela metálica ó de hojalata delgada llena de agujeros; al enfriarse, derrite cierta cantidad de hielo, y se recoge el agua de fusion por una espita situada debajo de la vasija. El hielo que hay entre las dos vasijas exteriores, impide que el calor exterior funda el que está en contacto con el cuerpo caliente.

El método del calorímetro de hielo no es de tan gran precision como el de las mezclas, á no

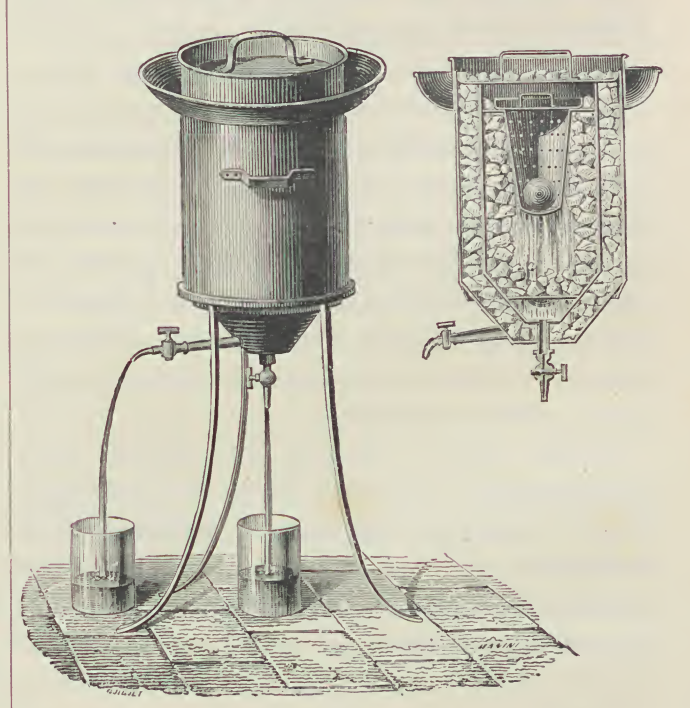


Fig. 97.—Calorímetro de hielo de Laplace y Lavoisier

ser que se opere en masas algo considerables. Si la temperatura llega á 9 ó 10 grados, el aire exterior penetra por la espita del fondo, reemplaza al aire más frio que, á causa de su densidad sale por ella, y contribuye á fundir cierta cantidad de hielo. Para remediar este inconveniente, Lavoisier y Laplace se reducian á operar solamente cuando la temperatura exterior habia bajado á 3 ó 4, ó mejor aún á 1 ó 2.° Entónces respondian de la exactitud de sus experimentos con una cuadragésima ó quincuagésima de diferencia á lo sumo (1). Existe otra causa de

(1) Sin embargo, conviene operar cuando la temperatura de la atmósfera esté sobre cero; porque, segun hacen observar los dos distin-

incertidumbre, la cual consiste en que al fin del experimento, la superficie de los fragmentos de hielo se empapa de una cantidad de agua que no es ya la misma que al principio, puesto que el volúmen y por consecuencia la superficie de los fragmentos han cambiado á causa de la fusion.

Hay otro método para medir los calores específicos; el llamado de *enfriamiento*, porque está basado en el mayor ó menor espacio de tiempo que invierten los cuerpos en enfriarse un mismo número de grados, cuando se los pone en un recinto vacío, cuya temperatura es constante. Colocado el cuerpo en un vasito de plata bruñido por fuera, se le introduce en el centro de un recipiente metálico con las paredes internas dadas de negro de humo bien seco. Hácese el vacío en el recipiente, y se anota el tiempo que trascurre entre los momentos en que el termómetro de la vasija desciende un número determinado de grados bajo la temperatura inicial. Se repite el mismo experimento reemplazando el cuerpo con agua destilada, deduciéndose de él la relacion de las cantidades de calor cedidas en los dos casos, la cual es la de los calores específicos.

Tobías Mayer discurrió este método que, perfeccionado en primer lugar por Dulong y Petit, y usado por Regnault, acabó por resultar defectuoso para los sólidos y aplicable únicamente á los cuerpos líquidos, segun lo reconoció este último físico.

III

LEYES DE LOS CALORES ESPECÍFICOS DE LOS CUERPOS SIMPLES Y COMPUESTOS

A continuacion insertamos un cuadro que contiene los calores específicos de cierto número de cuerpos, simples ó compuestos, en estado sólido ó líquido; recordemos que se toma por unidad el del agua, y que los valores del cuadro, clasificados por órden decreciente, expresan en general para los sólidos el calor específico medio entre las temperaturas extremas de 0° y de + 100; para los líquidos, dicho calor es relativo á la temperatura media de + 15°.

guidos operadores, «si la temperatura exterior estuviese bajo cero, la atmósfera podria enfriar el hielo interior. Así en tiempo de heladas, convendrá encerrar la máquina en una habitacion cuyo interior se haya caldeado préviamente. Es tambien necesario que el hielo de que se hace uso no esté bajo cero, pues si así fuese, habria que machacarlo, extenderlo por capas muy delgadas, y conservarlo así algun tiempo en un lugar cuya temperatura estuviese sobre cero.» (OBRAS COMPLETAS de Lavoisier, *Memoria sobre el calor*, t. II).

CUERPOS SÓLIDOS

SUSTANCIAS	CALORES ESPECIFICOS
1.° *Metales y metaloides.*	
Sodio.	0,293
Magnesio.	0,250
Aluminio.	0,218
Azufre ordinario.	0,203
— blando, húmedo.	0,184
Fósforo ordinario.	0,179
— rojo.	0,170
Potasio.	0,170
Hierro fundido.	0,130
Manganeso.	0,120
Acero.	0,117
Hierro.	0,114
Níkel.	0,108
Cobalto.	0,107
Zinc.	0,096
Cobre.	0,095
Laton.	0,094
Arsénico.	0,081
Paladio.	0,059
Plata.	0,057
Cadmio.	0,057
Estaño.	0,056
Iodo.	0,054
Antimonio.	0,051
Oro.	0,052
Platino.	0,032
Plomo.	0,031
Bismuto.	0,031
Mercurio sólido.	0,031
2.° *Oxidos, sales anhidras.*	
Carbonato de sosa.	0,273
Magnesia.	0,244
Borato de sosa.	0,238
Sulfato de sosa.	0,231
Fosfato de sosa.	0,228
Sulfato de magnesia.	0,221
Carbonato de potasa.	0,216
— de cal (creta).	0,215
Cloruto de sodio.	0,214
Carbonato de cal (mármol).	0,210
— — (espato).	0,208
— — (aragonita).	0,208
Alúmina.	0,198
Sulfato de cal.	0,196
Cloruro de calcio.	0,164
Nitrato de plata.	0,143
Cloruro de cobre.	0,138
Sulfuro de zinc.	0,123
Bromuro de potasio.	0,113
Ioduro de potasio.	0,082
Sulfuro de plata.	0,074

SUSTANCIAS	CALORES ESPECIFICOS
3.° *Varias materias.*	
Madera de pino.	0,650
— de roble.	0,570
Hielo (agua sólida).	0,504
Carbon vegetal.	0,241
Coke..	0,201
Vidrio (crown-glass)..	0,198
Cristal (flint-glass).	0,190
LÍQUIDOS	
Alcohol á 85°.	0,659
Acido clorhídrico..	0,600
Alcohol absoluto.	0,579
Eter absoluto.	0,533
Esencia de trementina.	0,421
Bencina..	0,399
Acido sulfúrico (á 1,80).	0,335
Aceite de oliva.	0,310
Sulfuro de carbono.	0,238
Cloroformo..	0,225
Bromo.	0,111
Mercurio.	0,033

El exámen de este cuadro y la comparacion de los números que contiene prueban que hay ciertas relaciones generales entre el calor específico, la densidad, el estado y la estructura física de los cuerpos. Por ejemplo, los metales más densos son los dotados de ménos capacidad para el calor. Esta relacion es más apreciable por lo que atañe al oro, al platino, al bismuto, y al mercurio, que se ven al final del cuadro, al paso que el potasio, el magnesio y el aluminio están al principio.

El estado físico ejerce cierta influencia; el mercurio líquido tiene mayor calor específico que el sólido, así como menor densidad, observacion que puede hacerse extensiva á otros cuerpos; el calor específico del hielo es la mitad menor que el del agua, pero su densidad es tambien menor. El calor del bromo líquido es 0,111; el del bromo sólido no pasa de 0,084.

Los sólidos que, como el fósforo, el azufre y el carbonato de cal, pueden adquirir muchos modos de agregacion molecular, tienen tambien calores específicos que varian con su estructura. El carbono es uno de los cuerpos que mayores diferencias presentan por este concepto. Vemos que el carbon vegetal tiene por calor específico 0,241, el coke 0,201; en estado de grafito varian estas cifras entre 0,197 y 203; el diamante sólo tiene de 0,146 á 0,148, y por el contrario, el del negro animal llega á 0,260.

El calor específico medio de una misma sustancia sube generalmente con la temperatura. Hé aquí algunas cifras determinadas por Dulong y Petit:

	De 0° á 100°	De 0° á 300°
Mercurio.	0,033	0,035
Platino..	0,036	0,036
Antimonio.	0,051	0,055
Plata.	0,056	0,061
Zinc.	0,093	0,102
Cobre.	0.095	0,101
Hierro..	0,110	0,122
Vidrio.	0,177	0,190

Véanse otros resultados obtenidos por Regnault:

	De —77°,7 á + 10°	De + 10° á + 30
Fósforo.	0,174	0,189
Plomo.	0,0307	0,0314 (á + 100°)

Hemos supuesto que el calor específico del agua es constante, y la verdad es que crece casi imperceptiblemente; pero en las investigaciones de presion se debe tener en cuenta este aumento. Otros líquidos como el alcohol, la esencia de trementina, el sulfuro de carbono, el éter y el cloroformo tienen una variacion mucho más marcada; por ejemplo, las indagaciones de Regnault han demostrado que el calor específico del alcohol, que es igual á 0,522 entre —23° y 0°, se eleva á 0'621 de 0° á 66°; el del éter, entre —20° y +30°, pasa de 0,523 á 0,538; el del cloroformo entre —30° y 0°, sube á 0,235 entre 0° y 60°.

Pero lleguemos á la ley más importante de cuantas se han formulado sobre los calores específicos, ley que descubrieron Dulong y Petit en 1818, comparando los valores que habian obtenido, por el método de enfriamiento, relativamente á los calores específicos de trece cuerpos simples, con los pesos atómicos de los mismos elementos, habiendo deducido *que los átomos de todos los cuerpos simples tienen la misma capacidad para el calor.* Entremos en algunos detalles acerca de este asunto.

Sábese que los cuerpos simples se combinan entre sí en proporciones definidas, y que si dos cuerpos simples ó compuestos se unen para formar dos ó muchas combinaciones, considerando constante el peso de uno de ambos, los pesos del otro cuerpo varian de una combinacion á otra con arreglo á proporciones simples; es la ley de las proporciones múltiples descubierta por Dalton, la cual ha sugerido á los químicos

la hipótesis de los átomos, partes indivisibles de la materia de los cuerpos ponderables. El peso del átomo debe de ser invariable en un mismo cuerpo simple, pero variable de un cuerpo á otro. Tomando por unidad el peso de uno de ellos, del átomo de hidrógeno por ejemplo, los de los otros cuerpos simples son lo que se llama en química sus *equivalentes* ó tambien sus *pesos atómicos*.

Por otra parte, hácia la misma época en que Dalton formulaba la ley de las proporciones múltiples, Gay-Lussac averiguaba que los volúmenes de los gases que se combinan entre sí están siempre en proporciones simples, y que sucede lo propio con el volúmen del gas ó del vapor que resulta de su combinacion. Así es que dos volúmenes de hidrógeno combinados con uno de oxígeno dan exactamente dos de vapor de agua. Admítese tambien como consecuencia natural de las leyes de la dilatacion de las sustancias gaseosas, que los átomos de los gases están, á la misma presion y temperatura, á igual distancia unos de otros, de suerte que dos volúmenes iguales de gases diferentes contienen siempre el mismo número de átomos. Siendo así, las densidades de los gases, es decir, los pesos de estos gases á igualdad de volúmen, son evidentemente proporcionales á sus pesos atómicos.

Merced á las leyes de Dalton y de Gay-Lussac han podido los químicos determinar los pesos atómicos de los cuerpos simples, así como los pesos de las moléculas de los compuestos.

Una vez recordadas estas nociones, veamos cómo pudieron comprobar Dulong y Petit la ley ántes enunciada, esto es, que el calor específico de un átomo es el mismo para todos los cuerpos simples. Los valores que dichos físicos dedujeron con respecto á los calores específicos de los trece cuerpos estudiados por ellos, representaban segun la definicion las cantidades de calor absorbidas por la mitad de peso ó sea por el kilógramo. Para tener la cantidad absorbida por un átomo, era preciso dividir los calores específicos hallados por los números relativos de los átomos, ó lo que es lo mismo, multiplicarlos por los pesos atómicos correspondientes, por cuanto estos números están sin duda alguna en razon inversa del peso de cada átomo. Así pues, para que la ley de Dulong y Petit sea exacta, se requiere que el producto del calor específico de un cuerpo simple por su peso atómico sea el mismo para todos, sea un número constante. Pues bien, así resultaba para con los trece cuerpos cuyos calores específicos habian medido los dos físicos mencionados. Hé aquí en efecto los resultados de sus cálculos y experimentos:

Cuerpos simples	Calores específicos	Peso de los átomos	Productos
Bismuto. . . .	0,0288	13,90	0,383
Plomo.. . . .	0,0293	12,95	0,379
Oro..	0,0298	12,43	0,370
Platino. . . .	0,0314	11,16	0,374
Estaño. . . .	0'0514	7,35	0,378
Plata.	0,0557	6,75	0,376
Teluro.. . . .	0,0912	4,03	0,368
Zinc. . . .	0,0927	4,08	0,374
Cobre.	0,0941	3,96	0,376
Níkel.	0,1055	3,69	0,382
Hierro.. . . .	0,1100	3,39	0,373
Cobalto. . . .	0,1498	2,46	0,388
Azufre.. . . .	0,1880	2,01	0,378

Como se ve, las diferencias entre los productos eran sobrado insignificantes para que se las pudiera atribuir, ya á errores de observacion, ya á la incertidumbre de los números dados por las análisis químicas para el peso de los átomos.

La ley de Dulong y Petit tenia demasiada importancia para que no se la sometiera á más amplias comprobaciones. Este fué uno de los principales motivos que indujeron á Regnault á emprender sus curiosas indagaciones sobre los calores específicos; pero los resultados que obtuvo no fueron tan favorables como los obtenidos por los físicos que formularon la proporcion entre los pesos de los átomos y el calor específico. Los productos variaban entre 0,38 y 0,42, no pudiendo achacarse la diferencia á incertidumbres y errores en los experimentos. Con todo, Regnault no dedujo de ello que la ley de la igualdad del calor específico sea falsa, apoyándose para creerlo así en las siguientes razones:

«Esta ley, dice, representaria con rigurosa exactitud los resultados de la experiencia, si se pudiera tomar el calor específico de cada cuerpo en un punto determinado de su escala termométrica, y si se le pudiera eximir de todas las influencias extrañas que lo modifican en la observacion. Estas influencias pueden ser de diferente naturaleza. Los cuerpos que se reblan-

decen ántes de derretirse completamente, contienen probablemente, ántes de su liquefaccion, una porcion de su calor de fusion que en el experimento se agrega al calor específico. Por otra parte, la capacidad calorífica, tal como la determinamos experimentalmente, se obtiene en virtud de la observacion de la cantidad de calor que el cuerpo ha debido absorber para producir su elevacion de temperatura (cuya cantidad es, propiamente hablando, su calor específico), con más, la cantidad de calor que ha debido tomar para producir su dilatacion. Esta última cantidad de calor, que podria llamarse *calor latente de dilatacion*, se agrega en el experimento al específico; es muy grande en los cuerpos gaseosos, y bastante más escasa en los sólidos y líquidos; pero nunca es despreciable, y forzosamente ha de hacer variar de un modo sensible el calor específico observado.

»Todas estas causas de error se complican con la eleccion arbitraria del orígen á partir del cual se cuentan las elevaciones de temperatura de cada cuerpo, eleccion no determinada por alguna propiedad física como el punto de fusion ó ebullicion, pero que resulta ser la misma para cuerpos de naturaleza totalmente distinta. El aumento del calor específico con la temperatura bastaria por sí solo para demostrar la necesidad de elegir, respecto de cada sustancia, un punto de partida en relacion con alguno de sus otros caractéres específicos.»

Sea lo que quiera de estas dificultades, lo cierto es que la ley del calor específico de los átomos para los cuerpos simples merece tanta mayor atencion cuanto que se ha descubierto una ley análoga entre los calores específicos y los pesos atómicos de los cuerpos compuestos. M. Newmann ha visto que el producto de estos números es constante en una misma clase de cuerpos ó en los de constitucion química semejante, pero que es variable de una clase á otra. Regnault ha dado la siguiente fórmula general, que comprende la ley de Dulong y Petit y la de Newmann como casos particulares: *En los cuerpos de igual composicion atómica y de constitucion química semejante, el calor específico está en razon inversa del peso atómico.*

Examinando las tablas siguientes, podrá el lector formarse una idea clara del estado de la cuestion, en lo que atañe á la mayor ó menor conformidad de las leyes enunciadas con los resultados numéricos deducidos de las investigaciones de los físicos y químicos sobre tan intrincadas cuestiones. Haremos notar únicamente que los pesos atómicos son aquí los que se obtienen tomando por unidad el peso de átomo de hidrógeno (1).

I.—CUERPOS SIMPLES (LEY DE DULONG Y PETIT)

Sustancias	Calores específicos	Pesos atómicos	Productos del calor específico por el peso atómico
Antimonio. . .	0,051	122	6,22
Arsénico. . . .	0,081	75	6,07
Azufre.. . . .	0,203	32	6,50
Bismuto. . . .	0,031	210	6,51
Cadmio. . . .	0,057	112	6,38
Cobalto. . . .	0,107	59	6,30
Cobre.. . . .	0,095	63,4	6,02
Estaño. . . .	0,056	118	6,60
Hierro.. . . .	0,114	56	6,38
Iodo.	0,054	127	6,85
Magnesio.. . .	0,250	24	6,00
Manganeso. . .	0,120	27,5	3,30
Mercurio.. . .	0,033	100	3,30
Níkel.	0,108	59,2	6,40
Oro..	0,032	196,4	6,30
Paladio. . . .	0,059	53,2	3,14
Plata.	0,057	108	6,16
Platino. . . .	0,032	197,5	6,32
Plomo.. . . .	0,031	207	6,40
Potasio. . . .	0,170	39,1	6,60
Sodio.	0,293	23	6,73
Zinc..	0,095	65	6,20

II.—CUERPOS COMPUESTOS (LEY DE NEWMANN)

Oxido de plomo, PbO. . .	0,051	111,5	5,68
— de mercurio, HgO. .	0,052	108	5,61
— de cobre, CuO.. . .	0,142	39,7	5,63
Cloruro de plata, Ag^2 Cl. .	0,091	143,5	13,05
— de cobre, Cu^2 Cl. .	0,138	98,9	13,64
— de sodio, Na^2 Cl. .	0,214	58,5	12,52
— de plomo, Pb Cl. .	0,066	139	9,17
— de mercurio, Hg Cl.	0,069	135,5	9,34
— de zinc, Zn, Cl. . .	0,136	68	9,24
Nitrato de plata, $Ag^2O\ AzO^5$.	0,143	170	24,31
— de potasa, $K^2O\ AzO^5$.	0,239	101,1	24,16
— de sosa, $Na^2O\ AzO^5$.	0,278	85	23,63
Sulfato de cal, CaO, SO^3. .	0,196	68	13,32
— de barita, BaO SO^3. .	0,113	116,5	13,16
— de plomo, PbO SO^3..	0,087	151,5	13,18
Carbonato de cal, CaO CO^2.	0,210	50	10,50
— de barita, BaO CO^2.	0,110	98,5	10,83
— de hierro, FeO CO^2.	0,193	58	11,19

(1) Se observará que el producto de tres cuerpos simples de la tabla es próximamente la mitad del promedio 6,36 de los otros miembros, lo cual tal vez consista en el valor de sus pesos atómicos, que es dos veces menor. Ciertos físicos duplican en efecto este valor para los

IV

CALOR ESPECIFICO DE LOS GASES

Los diferentes métodos expuestos en los artículos anteriores tenian por objeto determinar el calor específico de los cuerpos en estado sólido ó líquido; pero no era ménos importante medir el de los gases. En 1784, Lavoisier y Laplace hicieron con su calorímetro algunos experimentos á fin de medir la *cantidad de hielo que funden una libra de aire vital y otra de aire de la atmósfcra al enfriarse, desde 60 grados del termómetro hasta el punto de la congelacion*. El gas cuyo calor específico se proponian medir pasaba primero desde el gasómetro á serpentines metidos en vasijas llenas de agua que se podia calentar á beneplácito; luégo á otro serpentin rodeado del hielo del calorímetro, de donde volvia á salir á cero despues de ceder el calor adquirido al hielo, recogiéndose y pesándose la cantidad derretida de éste. Algunos años despues, Crawford se valia con el mismo objeto del método de las mezclas. Siguieron á éste Leslie, Gay-Lussac, Dalton, Dulong, etc.; pero todos los resultados obtenidos adolecian de varias causas de error, que probaban su discordancia.

Por fin en 1813 presentaron los físicos franceses Delaroche y Berard una Memoria á la Academia de ciencias, que fué premiada por esta, y en la cual se resolvia con alguna precision el delicado problema de la determinacion del calor específico de los gases. Se puede plantear este problema de dos modos distintos. Relativamente á los sólidos y á los líquidos, hemos visto que los calores específicos medidos se componen de dos partes, confundidas en ellos; el calor absorbido por la elevacion de temperatura del cuerpo y el empleado en producir la dilatacion correspondiente: por lo demás, supónese que la presion es constante miéntras duran los experimentos. Por lo que hace á los gases, se puede y se debe distinguir entre la cantidad de calor necesaria para elevar un grado la temperatura de la unidad de peso, y la que seria capaz de producir el mismo efecto cuando el gas puede dilatarse libremente. En efecto, sábese por experiencia que todo cambio de volúmen de un gas da lugar á una variacion de temperatura; cuando se le comprime, se desprende calor y la temperatura se eleva, al paso que sucede lo contrario si el gas se dilata.

De aquí resultan dos calores específicos en un mismo gas: el calor específico *á presion constante*, y el calor específico *á volúmen constante*. Este es el primero que Delaroche y Berard determinaron en su gran trabajo. Hé aquí una ligera reseña del método de que se valieron estos físicos.

El gas contenido en una vejiga de grandes dimensiones se escapaba de ella con velocidad constante, y pasaba á calentarse en el interior de un largo tubo de cobre que rodeaba un cilindro lleno de vapor de agua hirviendo. Al salir del tubo penetraba en un serpentin metido en un calorífero lleno de agua fria, y le cedia todo el calor que habia adquirido á su paso por el tubo calentado por el vapor. La constancia de la salida del gas y por consiguiente de la presion se obtenia con dos vasos de Mariotte que comunicaban con dos globos cada uno de los cuales contenia una vejiga llena de gas; así podia prolongarse la circulacion de una misma cantidad de gas el tiempo suficiente para que la temperatura del agua del calorímetro pudiera subir muchos grados. De este modo se calculaba la cantidad de calor abandonada por la unidad de volúmen ó por la de peso del gas para bajar la temperatura de 100° á otra determinada. Habia lugar, por supuesto, á varias correcciones relativas á las pérdidas de calor que la radiacion y la conductibilidad producian en las diferentes partes del aparato. Una de las causas de error que no podia presumirse en la época en que se hicieron estos notables experimentos, procedia de la endósmosis; á la sazon se ignoraba que el aire exterior podia penetrar en las vejigas y mezclarse con el gas interior que contenian.

Sin embargo, los resultados fueron muy parecidos á los que algo despues obtuvo Regnault valiéndose de métodos perfeccionados. Describamos sucintamente el procedimiento por él adoptado para determinar el calor específico de

cuerpos en cuestion, que son el manganeso, el mercurio y el paladio. Otros hacen lo contrario y adoptan números la mitad menores para la mayoría de los cuerpos simples que figuran en el cuadro.

El carbono parece eximirse enteramente de la ley de Dulong. Ya hemos indicado las considerables diferencias que se encontraban para su calor específico segun su estado molecular. Sin embargo, si se multiplica 0,26, calor específico del negro animal, por 24, peso atómico del carbono duplicado, se tendrá 6,24, que cuadra con la ley.

los gases á presion constante. Empezaba por llenar un recipiente metálico de gran capacidad de gas perfectamente purificado, seco y muy comprimido, cuya temperatura se mantenia constante por medio de una corriente exterior de agua fria: un manómetro indicaba su presion. El gas pasaba desde este gasómetro á un baño de aceite por un tubo provisto de un regulador y que se desarrollaba en el baño en forma de serpentin, y desde allí llegaba al calorímetro. Este presentaba una disposicion particular; contenia una serie de cajas metálicas superpuestas, en las que penetraba el gas; pero, con objeto de proporcionarle el trayecto más largo posible, las cajas estaban divididas interiormente por tabiques de forma espiral, y despues de recorrer sus sinuosidades se escapaba al exterior. Con el regulador ántes mencionado se podia variar como se quisiera la rapidez de salida del gas, y disponiéndole de un modo á propósito, se podia tambien operar á presiones muy diferentes.

Concretémonos á esta ligera descripcion y pasemos á los resultados obtenidos. Como conclusion general de sus investigaciones, Regnault ha reconocido: 1.° que el calor específico de los gases es independiente de la presion, excepto en la proximidad de su punto de liquefaccion; 2.° que crece con la temperatura para los gases que se desvian sensiblemente de la ley de Mariotte. Así pues, el calor específico del aire es rigurosamente constante desde —30° hasta + 225°; lo propio sucede con el calor específico, al paso que los del ácido carbónico y del protóxido de ázoe aumentan con la temperatura.

Hé aquí los calores específicos medios entre 0° y 200° de algunos gases, con relacion al del agua tomada por unidad á la presion constante de una atmósfera:

Aire.	0,2375	Cloro.	0,1210
Oxígeno.	0,2175	Vapor de bromo. . . .	0,0555
Azoe.	0,2438	Acido sulfuroso. . . .	0,1544
Hidrógeno.	3,4090	— clorhídrico. . .	0,1845
Acido carbónico. . .	0,2169	— sulfhídrico. . .	0,2432
Protóxido de ázoe. . .	0,2262	Gas amoniaco. . . .	0,5084
Oxido de carbono. . .	0,2370	Eter clorhídrico. . .	0,2737
Gas oleificante. . . .	0,5930	Bióxido de ázoe. . .	0,2317

Todos estos números representan, segun la definicion, las cantidades de calor que elevarian un grado la temperatura de la unidad de peso de cada uno de estos gases. Pero á la misma presion, los pesos iguales tienen volúmenes inversamente proporcionales á las densidades. Por consiguiente, si se multiplican los calores específicos arriba citados por la densidad de cada gas, el producto representará la cantidad de calor que se necesitaria para elevar un grado la temperatura de la unidad de volúmen. Los productos obtenidos de este modo serán los *calores específicos de los gases con relacion á la unidad de volúmen.* Admítese, por otra parte, que á unidad de volúmen, los gases contienen el mismo número de átomos. Los mismos productos representarán pues los calores específicos atómicos de los gases, ó por lo ménos números proporcionales, y por tanto deberán ser iguales entre sí, si la ley de Dulong y Petit es aplicable á los gases.

Veamos lo que la experiencia nos dice acerca de esto.

El cuadro siguiente da los productos de los calores específicos por las densidades del aire y de cinco gases, tres de ellos permanentes, es decir, los calores específicos con relacion al volúmen, é indica tambien los productos de los calores específicos por los pesos atómicos, ó los calores específicos atómicos de los mismos cinco gases:

	CALORES ESPECIFICOS		
	á peso igual C	á volúmen igual C*d*	atómicos C*A*
Oxígeno. . . .	0,2175	0,2405	3,4800
Hidrógeno. . .	0,4090	0,2361	3,4090
Azoe.	0,2438	0,2368	3,4132
Cloro.	0,1210	0,2979	4,2955
Bromo.	0,5555	0,3073	4,3456
Aire.	0,2375	0,2375	»

Las tres primeras cantidades de las dos últimas columnas son sensiblemente iguales entre sí; pero no sucede lo mismo con las siguientes. Los gases ántes llamados permanentes, es decir, que en las condiciones ordinarias, distan de su punto de liquefaccion, siguen, pues, la ley de Dulong y Petit; pero es de notar que su calor específico atómico apénas llega á la mitad del que resulta para los sólidos y líquidos. En cuanto á los gases como el cloro y el bromo, parecen apartarse notablemente de la ley.

En resúmen, las leyes generales en virtud de las cuales hemos procurado expresar las relaciones que existen entre las capacidades de los cuerpos para el calor bajo sus tres estados,

distan mucho de presentar la uniformidad, la constancia que deben caracterizar á las leyes físicas ó naturales. Sin embargo, tales cuales son, y con sus excepciones y anomalías, tienen verdadero interés para los físicos y químicos. Por otra parte, es de creer que los rápidos progresos con que la teoría mecánica del calor ha enriquecido la ciencia en estos últimos tiempos, y que hoy persigue un gran número de sabios, desvanecerán las dudas y oscuridades que aún subsisten acerca de este punto, y darán la razon de las anomalías indicadas.

CAPÍTULO XI

CALORIMETRÍA.—CALORES LATENTES DE FUSION Y DE VAPORIZACION

I

CALOR LATENTE DE FUSION

Recordemos el fenómeno que caracteriza la fusion de los sólidos, cuando esta fusion se efectúa bruscamente, sin que el cuerpo sufra un reblandecimiento prévio; la transicion del estado sólido al líquido se efectúa sin aumento de temperatura, miéntras la masa del cuerpo no se ha fundido enteramente. El trabajo de fusion absorbe todo el calor suministrado por el foco ó por el medio en que está el sólido, y como este calor no se manifiesta con una elevacion termométrica, es, segun hemos visto, lo que se llama *calor latente de fusion*.

Cuando, por un fenómeno inverso, la masa líquida sometida á un enfriamiento suficiente recobra el estado sólido, devuelve al medio ambiente todo el calor que la fusion habia absorbido, haciéndolo en cantidad precisamente igual si la masa no ha variado; y en efecto, durante el tiempo necesario para la solidificacion, la temperatura subsiste fija é igual á la del punto de fusion, por intensa que sea la causa del enfriamiento; no empezando á descender debajo de cero hasta que se ha solidificado la masa entera. Si el cuerpo es de naturaleza á propósito para permanecer líquido, en las circunstancias que hemos estudiado, á una temperatura inferior á la de la fusion, en una palabra, si hay *sobrefusion*, el calor latente se hace perceptible espontáneamente en el momento de volver al estado sólido; la temperatura sube con rapidez al punto de fusion.

Hemos dicho que el doctor Black fué quien, en 1762, llamó la atencion de los físicos hácia la existencia del calor latente de fusion, ó mejor aún, hácia el hecho de la absorcion del calor causada por el cambio de estado. Hizo más; trató de medirla y se valió con este objeto de varios métodos, en especial el de las mezclas, y vió que un peso dado de hielo absorbe para derretirse 80 veces tantas calorias como la misma masa de agua para elevar un grado su temperatura; efectivamente, mezclando pesos de agua á 80° y de hielo fundente, obtuvo la fusion completa del hielo, sin que la temperatura final del líquido se hubiera elevado sensiblemente sobre cero. Lavoisier y Laplace determinaron con su calorímetro el calor de fusion del hielo. Wilkie sumergia en agua hirviendo dos redomas, una llena de agua á 0°, y otra de nieve tambien á 0°: observaba y comparaba las temperaturas de ambos líquidos, cuando la del agua de la redoma que la contenia habia subido á 72°.

Estas primeras indagaciones, hechas por métodos que, segun hemos visto, daban lugar á varias causas de error, dieron por término medio una cifra muy baja para el calor latente de fusion del hielo, es decir, 75 calorias en lugar de 79. El resultado deducido por Black se acercaba más á la verdad.

La Provostaye y Desains determinaron con gran precision el calor latente de fusion del hielo por el método de las mezclas, habiendo operado del modo siguiente. Introducian un pedazo de hielo bien puro á 0° en su calorímetro de laton muy delgado, lleno de un peso dado de agua, y á una temperatura conocida pero

superior á 0°. Agitando entónces el agua de la vasija hasta la completa fusion del trozo de hielo, anotaban con cuidado la temperatura final y pesaban el calorímetro: el aumento de peso correspondia á la cantidad de hielo fundido.

Con esto tenian los elementos necesarios para plantear una ecuacion muy sencilla que daba la solucion del problema: por una parte, el número de calorias perdidas por el agua del calorímetro para bajar un número determinado de grados; por otra, el número de calorias necesario para la fusion, aumentado con el que el agua de fusion ha absorbido para pasar de 0° á la temperatura final de la mezcla. Verdad es que debia tenerse en cuenta la influencia de la vasija y la del termómetro, y agregar su *valor en agua* al peso de la del calorímetro; y hacer luégo las insignificantes correcciones procedentes de las pérdidas y ganancias de calor que pudieran ocurrir durante el experimento.

El resultado obtenido por ambos físicos para el calor latente de fusion del hielo fué un número próximamente igual á 79,25. Tal es el número de calorias necesarias para reducir un kilógramo de hielo á 0° á agua tambien á 0°. Las investigaciones de Regnault le han dado el mismo resultado.

Este método es aplicable tambien á cualquier otro sólido cuya temperatura del punto de fusion sea suficientemente baja, por ejemplo al bromo y al mercurio. Si se trata de cuerpos cuyo punto de fusion sea alto, como la mayoría de los metales, es asimismo aplicable el método de las mezclas, con tal de invertir el órden de las fases del fenómeno, es decir, fundiendo préviamente el cuerpo sólido, y procurando en seguida averiguar la cantidad de calor que desprende al solidificarse. Pero se han de tomar ciertas precauciones: deberá tomarse el líquido en una masa no fundida en su totalidad ó cuando empieza á solidificarse, para tener la certeza de que su temperatura, en el momento de introducirlo en el calorímetro, es bien igual á la del punto de fusion. Además, si la temperatura de fusion del cuerpo excede mucho de 100°, no se le pondrá inmediatamente en contacto con el agua del calorímetro, que produciria una formacion brusca de vapor, cuyo efecto térmico seria de difícil apreciacion. Entónces se le encierra en una caja metálica que se introduce en el agua, no dejando que esta penetre en la caja sino al fin del experimento.

Aunque la medida del calor latente de fusion de los sólidos que se liquidan á una temperatura elevada es sencilla en teoría, presenta grandes dificultades prácticas y requiere muchas precauciones. Person, á quien la ciencia es deudora de una serie importante de experimentos sobre este difícil punto, ha descubierto una interesante relacion entre los calores latentes de fusion de los metales y su elasticidad. Cuanto mayor es esta, es decir, cuanto más considerable es el peso necesario para alargar en una fraccion dada un alambre, mayor es tambien su calor latente de fusion. El mismo físico ha formulado una ley empírica que relaciona el calor latente de fusion de un cuerpo con sus calores específicos en los estados sólido y líquido, y cuyo enunciado es el siguiente: El calor latente de fusion de un cuerpo es igual á la diferencia entre los calores específicos de sus dos estados multiplicada por el número de grados que separa el punto de fusion de la temperatura —160° (1). El calor latente así calculado es, en efecto, próximamente igual al calor medido, respecto á cierto número de cuerpos.

Terminemos este artículo dando, con relacion al mismo físico, el calor latente de fusion de los cuerpos siguientes:

Hielo (agua sólida). . .	79,25	Estaño.	14,25
Fosfato de sosa. . . .	66,80	Bismuto..	12,64
Nitrato de sosa. . . .	62,97	Azufre.	9,37
Cloruro de calcio.. . .	40,70	Plomo.	5,37
Zinc.	28,13	Fósforo.	5,03
Plata..	21,07	Mercurio.	2,83

II

CALOR LATENTE DE VAPORIZACION

Tambien fué el doctor Black quien descubrió y trató de medir el calor latente de vaporizacion

(1) Esta temperatura de 160 grados bajo cero (número deducido por Pouillet para la temperatura de los espacios planetarios, deduccion hecha de la radiacion solar), debe ser, segun Person, la del *cero abso, luto*. Para llegar á esta conclusion, el sabio físico ha procurado averiguar-basándose en la ley formulada más arriba, cuál seria la cantidad total del calor contenido en un cuerpo, por ejemplo en un gramo de agua á 0°. Logró resolver este problema admitiendo que las cantidades totales de calor contenidas en dos cuerpos diferentes son entre sí como sus calores específicos, y que esta relacion es constante para todas las temperaturas. Halló 160 calorias para un gramo de agua á 0°,80 para uno de hielo á 0° tambien. Para cualquier otro cuerpo cuyo calor específico en estado sólido es *c* y tomado á 0°, se tiene pues un calor total igual á 160 *c*. De donde dedujo que si se quita á este cuerpo 160 veces el número de calorias que hacen variar 1° la temperatura, no contendrá ya calor; estará á cero absoluto. Anteriormente hemos visto las razones que aconsejan adoptar hoy la temperatura —273° para este punto de partida, que no deja de ser puramente teórico.

del agua, con cuyo objeto hizo el siguiente experimento. Puso sobre un hornillo, cuya temperatura suponia casi constante, una vasija llena de agua: contaba el tiempo que trascurria hasta el momento en que el líquido entraba en ebullicion, y luégo comparaba este tiempo con el que invertia el agua en trasformarse enteramente en vapor. La relacion entre ambos números era la de las cantidades de calor suministradas por el hornillo y absorbidas ya para la elevacion de la temperatura del agua á 100° ó ya para su evaporizacion. Tambien se valió de un procedimiento de que Watt se sirvió á su vez y que consistia en elevar el agua de una marmita de Papin á una temperatura superior á 100°. Abriendo entónces la válvula, se escapaba cierta cantidad de agua en estado de vapor; la restante volvia á bajar á 100° y el calor latente de vaporizacion era igual al perdido por el agua en este descenso de temperatura.

Posteriormente se han adoptado otros métodos más exactos, de los cuales describiremos el discurrido por Rumford, que, convenientemente modificado, empleó Despretz para determinar los calores latentes de vaporizacion de varios líquidos, como agua, éter, alcohol, sulfuro de carbono, etc., á la temperatura de su ebullicion al aire libre.

El principio de este método es muy sencillo. Consiste en recoger y pesar el líquido procedente de la condensacion del vapor al atravesar un serpentin metálico metido en el agua de un calorímetro. Para ello valíase Despretz de un aparato consistente en una retorta de cuello inclinado que contiene el líquido sometido al experimento; un termómetro que penetra en la retorta da á conocer la temperatura exacta del vapor en el momento de la ebullicion. Se puede rodear de paño el cuello de la retorta para evitar el enfriamiento y la condensacion del vapor; en todo caso, gracias á su inclinacion, el líquido que podria resultar de esta condensacion cae en la panza. Un calorímetro lleno de agua fria contiene un serpentin cuyas espiras atraviesa el vapor al salir del cuello de la retorta. El líquido procedente del vapor condensado pasa á un vaso cónico completamente cerrado que hay debajo del serpentin. Un termómetro introducido en el calorímetro marca la temperatura del agua de este al principio y al fin del experimento. Cuando este ha concluido, se recoge y pesa el líquido resultante de la condensacion, con lo cual se tienen los elementos necesarios para calcular el calor latente del vapor, á la temperatura y á la presion observadas. Además, el vaso cónico lleva un tubo que desemboca fuera del calorímetro, y el cual se puede poner á beneplácito en comunicacion con una máquina neumática ó bomba de compresion. Desde este momento se puede hacer variar la tension del vapor, ó lo que es lo mismo, la temperatura á que se produce la ebullicion del líquido.

Por supuesto que se han de tomar las precauciones habituales para evitar las pérdidas de calor por conductibilidad ó por radiacion, y tenerlas en cuenta al hacer los cálculos.

Hemos dicho que el método es aplicable á todos los líquidos vaporizables, y fácilmente se comprende; pero importaba conocer con exactitud el valor latente del vapor de agua, á toda presion y temperatura, punto que interesaba á la teoría lo mismo que á la práctica de las máquinas de vapor. Los experimentos de Watt, hechos en una época en que los métodos y los aparatos carecian de precision, habian hecho admitir una ley conocida con el nombre de *ley de Watt*, segun la cual se necesitaba siempre la misma cantidad de calor para trasformar en vapor un peso dado de agua, por ejemplo, un gramo, tomado á cero. Esta cantidad total se compone de dos partes, el calor invertido en calentar el agua hasta la ebullicion, y el latente de vaporizacion. Por otra parte se admitia que esta última era constante á toda presion.

Con objeto de comprobar la exactitud de estas leyes, Regnault emprendió una larga serie de experimentos sobre el calor latente del vapor de agua, con toda la precision que caracteriza sus prolijos trabajos sobre el calor. De este modo determinó el calor de vaporizacion del agua á todas las temperaturas comprendidas entre 0° y + 230°, es decir, entre las presiones de $0^m,004$ y 27 atmósferas. Este gran trabajo terminado en 1845, permitió al ilustre físico deducir que el calor latente del vapor de agua va disminuyendo á medida que crece la temperatura. A 0° es igual á 607; á 100° ya no es más que de 537, á 200° baja á 464. Si, por el contrario, se considera el calor total, el que se ne-

cesita para reducir á vapor un peso de agua igual á la unidad, tomado á 0°, se ve que crece constantemente. A 0° es igual á 607; á 100° equivale á 637°; á 200° á 664.

Regnault ha reconocido como verdaderas estas leyes, que contradicen las de Watt y de Southern (igualdad de calor latente á toda presion), en lo que atañe á los siguientes líquidos, cuyos calores latentes de vaporizacion ha determinado; sulfuro de carbono, éter, bencina, cloroformo y acetona. Es probable que sean generales.

Favre y Silbermann se han valido, para sus numerosos y notables estudios calorimétricos, aplicados principalmente al de los fenómenos de termo-química, de un aparato basado en un principio muy distinto de los que hemos descrito. Este aparato es el calorímetro de mercurio, con el que se puede medir igualmente los calores específicos, los latentes y los desarrollados por las combinaciones químicas. Se compone, conforme se ve en la fig. 98, de un recipiente esférico de cobre R, suspendido sobre un eje horizontal y que puede oscilar alrededor del mismo. Merced á dos llaves situadas en la parte inferior se puede llenar la esfera de mercurio, dándola vuelta, sirviendo una de las llaves para hacer el vacío en el recipiente, y la otra para introducir el líquido. Cuando aquél está lleno, se le vuelve despues de cerrar las llaves, y se pone el tubo que sobresale á la izquierda del grabado en comunicacion con un tubo capilar *ll'* cuidadosamente graduado. Entre el tubo y el recipiente, hay un globo E lleno de mercurio para impedir que penetre aire en el segundo. Con un tornillo metálico que se hace funcionar con el manubrio M se introduce un émbolo P en el mercurio, el cual hace que la parte superior del líquido suba á un punto fijo *o* del tubo termométrico. Cuando la temperatura del mercurio del calorímetro varía, sube ó baja por una causa cualquiera, el nivel avanza ó retrocede en el tubo, pudiéndose estudiar y medir sus movimientos desde alguna distancia, mirando por el anteojo L el tubo y la escala graduada que éste lleva. Favre y Silbermann empezaron por anotar el número de divisiones recorridas por la columna de mercurio por cada caloria cedida al calorímetro ó sustraida de él. Obtenian esta evaluacion haciendo hervir un peso de agua conocido, metido en la pipeta B; y dando vuelta á la pipeta hasta colocarla en la posicion que indica el contorno puntuado de la figura, hacian correr el agua al manguito *m*, donde se enfriaba á la temperatura ambiente, cediendo al mercurio un número de calorias fácil de calcular. Dividiendo entónces por este número la desviacion total del mercurio en el tubo capilar, obtenian por resultado el número de divisiones correspondientes á una caloria.

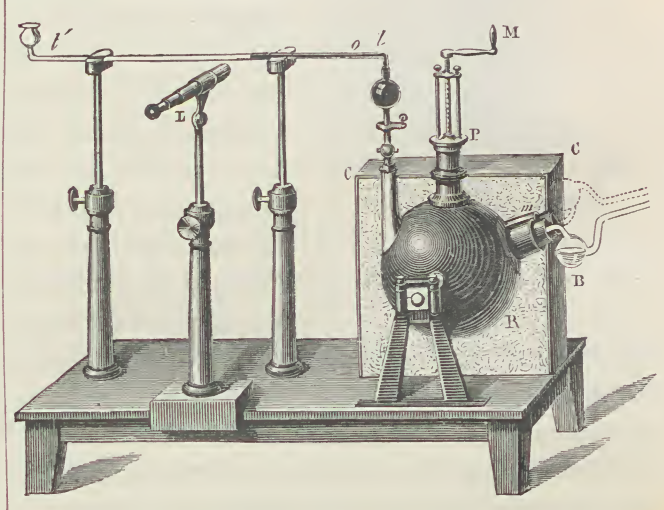


Fig. 98.—Calorímetro de mercurio de Favre y Silbermann

Compréndese ahora de qué modo procedian los operadores para medir un calor latente de vaporizacion, el desprendido en una combinacion química, etc. Introducian en el manguito, por medio de la pipeta, el vapor del líquido caldeado á la ebullicion á una temperatura conocida; al condensarse este calor en el manguito, cedia su calor al mercurio, y los grados indicados por la desviacion del nivel en el tubo *ll'* daban á conocer el número de calorias cedidas por un peso dado de calor condensado. Para medir un calor de combinacion, se introducia sucesivamente en el manguito las materias entre las cuales debia efectuarse la reaccion.

Durante las operaciones, el calorímetro estaba rodeado de una caja CC llena de algodon en rama que resguardaba todas sus partes de las pérdidas de radiacion (1).

(1) En una leccion consagrada al análisis de los trabajos de Favre, E. Sainte-Claire Deville apreciaba en estos términos el notable aparato que acabamos de describir: «El calorímetro de mercurio hace las veces de una verdadera balanza que mide la accion del calor por el efecto termométrico comunicado á una gran masa de mercurio. Me he servido de este instrumento, y debo confesar que para manejarle se necesita cierta práctica. Debe funcionar como un aparato que recibe una accion calorífica, sin dejar de permanecer á una temperatura muy inmediata á la exterior, y estando aislado de toda causa perturbadora

La figura 99 representa un calorímetro empleado por Dulong para medir el calor de combustion de un compuesto cualquiera, por ejemplo, de un gas. Este llega por el tubo *h* á la cámara de combustion C, y el oxígeno necesario para la combustion por los tubos *f* ó *p'*. Los productos de la reaccion se escapan al salir de la cámara al través de un serpentin metido como ella en el agua fria del calorímetro. Dos termómetros *tt'* marcan, el uno la temperatura del agua, y el otro, la de los productos de la combustion á su salida del calorímetro, debiendo ser iguales ambas temperaturas si se ha hecho bien el experimento.

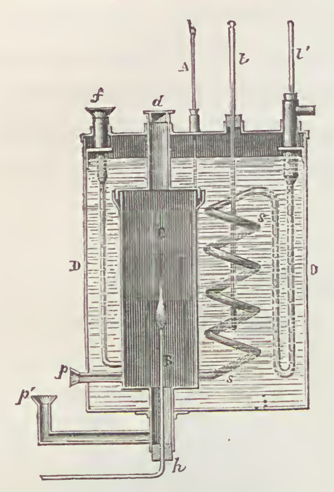


Fig. 99.—Calorímetro de combustion de Dulong

Dulong ha visto por este método que el calor desprendido por un gramo de hidrógeno que arde en el oxígeno y que produce agua es igual á 34601 calorias ó 34ᶜ,601, segun que se tome por unidad de caloria el calor necesario para elevar un grado la temperatura de un gramo ó de un kilógramo de agua. Favre y Silbermann han obtenido por resultado 34462. Por lo demás, hé aquí algunos resultados conseguidos por estos dos físicos relativamente al calor de combustion de varios cuerpos simples al arder en el oxígeno:

Cuerpos simples ó compuestos	Calor desprendido por 1 gramo de combustible
Hidrógeno.	34,462 calorias
Carbon ordinario.	8,080 —
Grafito natural.	7,797 —
Diamante.	7,770 —
Azufre nativo.	2,162 —
Sulfuro de carbono.	3,400 —
Alcohol.	7,184 —
Esencia de trementina. . . .	10,852 —
Acido esteárico.	9,616 —
Eter.	9,028 —
Aceite de oliva.	9,862 —

mediante numerosas y variadas precauciones, á la vez que como un aparato cuyo enfriamiento ó caldeo no son de despreciar, por más que sean suficientemente débiles. Digo que es una balanza porque M. Favre se ha valido de él para estudiar los fenómenos caloríficos apreciándolos en calidad y en cantidad, á la manera que un químico hace un análisis y pesa sucesivamente todos los cuerpos que dosifica.»

El calor desprendido por la combustion no tan sólo depende del combustible (y se ve, por ejemplo, que difiere considerablemente del azufre al hidrógeno), sino que varía en el mismo cuerpo con el gas comburente. Así es que Favre y Silbermann han deducido 23,950 calorias para el calor de combustion del hidrógeno en el cloro. Nos limitamos á tratar muy sucintamente de la calorimetría aplicada al estudio de las reacciones químicas. Los importantes resultados obtenidos por este concepto forman la base de una ciencia nueva, la TERMOQUÍMICA, ajena á la índole de esta obra.

III

INFLUENCIA DEL CALOR LATENTE DEL VAPOR DE AGUA, Y DE LOS CALORES ESPECIFICOS DEL AGUA Y DEL HIELO EN LOS CLIMAS

De cuantas sustancias han estudiado los físicos para determinar sus calores específicos en sus tres estados, así como los calores latentes de liquidez y elasticidad, no hay ninguna que merezca tanta atencion como el agua. Es un cuerpo tan universalmente difundido por la naturaleza, ó á lo ménos por la superficie del globo terráqueo, que el papel que desempeña en los fenómenos meteorológicos ha de ser forzosamente muy considerable, ya presente la forma sólida en los climas polares y durante el invierno en las zonas templadas, ya se muestre en forma líquida en los mares, rios, lagos y nubes, ó ya por último, en la de gas ó de vapor en la atmósfera. Las variaciones de temperatura y los cambios de estado del agua son el punto de partida ó la causa de porcion de cambios que nos afectan y nos interesan por muchos conceptos. Por otra parte, el uso del agua en la vida doméstica y en la industria tiene para nosotros no menor importancia, como así lo veremos cuando tratemos de las aplicaciones del calor y describamos las máquinas cuyo principio motor es la fuerza elástica del vapor de agua. Hemos dicho, en efecto, que la mayor parte de los trabajos que los físicos han emprendido acerca del calor tenian por objeto esta última aplicacion; y sobre los resultados de estos mismos trabajos se fundará definitivamente el mayor monumento científico del siglo XIX en el terreno de las ciencias físicas, la teoría mecánica del calor.

Por razones casi análogas, desempeñan el aire y su modo de obrar bajo la accion del calor una mision no ménos importante que el agua en los fenómenos de la física terrestre.

Recordemos algunas de las cifras relativas á los calores específicos del aire y del agua y á los calores latentes de este último cuerpo. Siendo 1 el calor específico del agua, el del hielo á 0° es 0,513, y el del aire, 0,2375. Por otra parte, para fundir un kilógramo de hielo á 0°, es preciso consumir una cantidad de calor igual á 79 calorias próximamente; se necesitan 607 calorias para reducir á vapor un kilógramo de agua á 0°; 592 calorias si el mismo peso está á + 15°, y 537 si á + 100°. El agua desprende las mismas cantidades de vapor si el cambio de estado es inverso, es decir, si el kilógramo de agua se trasforma en hielo, ó el de vapor en agua líquida.

De estos números, retengamos desde luégo los que se refieren al agua y al aire. El calor específico del agua equivale á poco más de cuatro veces el del aire; de lo cual se sigue que al enfriarse 1° un peso de agua de 1000 kilógramos, desprende una cantidad de calor suficiente para elevar asimismo 1° un peso de 4210 kilógramos de aire. Pero 4210 kilógramos de aire ocupan, á la presion barométrica normal y á 0°, un volúmen que es 770 veces el de un mismo peso de agua, es decir, igual á 3250 metros cúbicos. En su obra sobre el *Calor*, se expresa Tyndall del modo siguiente acerca de las consecuencias de este hecho: «Aquí se presenta por sí misma la gran influencia que el Océano debe ejercer como moderador de los climas. El calor del estío se almacena en el Océano, el cual lo va soltando poco á poco en invierno: este es ya un obstáculo para las temperaturas extremas en las islas: en ellas no puede hacer en verano el calor sofocante de los veranos de los continentes, ni los inviernos de las islas pueden ser tan crudos como los de aquellos. En varios puntos del continente de Europa se cogen frutos que nuestros veranos (los de Inglaterra) no pueden sazonar; en cambio allí son desconocidos nuestros árboles siempre verdes, pues no pueden conservar su follaje durante el invierno. El invierno de Irlanda es por regla general más apacible que el de Lombardía.»

Sin embargo, al reproducir estas observaciones, que nos parecen justas, no olvidemos que los casos particulares mencionados por Tyndall no dependen únicamente de la proximidad del Océano, sino tambien de la elevacion de la temperatura producida en aquellas regiones por la gran corriente de agua templada conocida con el nombre de Gulf-Stream. Los vientos ecuatoriales entran tambien por mucho en los fenómenos meteorológicos en cuestion. Así lo reconoce el sabio físico cuando dice: «Ahora sabemos que el Gulf-Stream y la difusion del calor por los vientos y los vapores son las causas reales de la suavidad del clima europeo.» Pero la causa física reside siempre y sobre todo en el gran calor específico del agua comparado con el del aire.

Los lagos desempeñan el mismo cometido que el Océano, aunque en menor extension; el calor almacenado por el agua suaviza la temperatura de las localidades circunvecinas. En el mes de diciembre de 1879, el doctor Forel hizo un sondeo en el lago Lehman y vió que la temperatura, que era de 5°,6 á la superficie y de 5°,4 á unos 170 metros de profundidad, habia bajado en cinco dias á 5°,4 á la superficie, de suerte que el agua del lago se habia enfriado en todo este espesor, ó si se quiere, habia cedido al aire una cantidad de calor fácil de valuar. Haciendo el cálculo con arreglo á los datos suministrados por los sondeos, el doctor Forel ha visto que la cantidad de calor perdida por el lago durante esos cinco dias equivalia á unos 10,000 millones de calorias, «ó sea, dice, á la cantidad de calor desprendida por la combustion de 1.250,000 toneladas de carbon, ó por la de un cubo de carbon de 100 metros de lado. Como el cielo estuvo generalmente nublado durante los cinco dias, la mayor parte de este calor ha quedado en el aire, contribuyendo así á atenuar en nuestro valle el frio que tan crudamente se hacia sentir en otras partes.»

El calor latente de fusion del hielo tiene tambien gran importancia en meteorología. El derretimiento de las nieves y de los hielos durante las estaciones de invierno es efecto de dos causas: la una directa, ó sea el calor que el sol radia; la otra indirecta, es decir, el calor que desprenden las masas de aire caliente conducidas por los vientos que proceden de las regiones ecuatoriales. Ya tendremos ocasion de

ver cómo se mide la cantidad de calor emanada de los rayos solares. En cuanto á la del aire, sabemos que su valor medio es ménos de la cuarta parte del calor específico del agua; pero como este sólo equivale á la 79.ª parte del calor latente de fusion del hielo, es fácil darse cuenta de la masa de aire caliente que se necesita para fundir un peso de hielo ó de nieve á 0°. Un metro cúbico de hielo á 0° pesa 930 kilógramos y para fundirse á 0° necesita $930 \times 79{,}25$ calorias. Por otra parte un metro cúbico de aire á 0° pesa 1,293 kilógramos; pero suponiendo este mismo volúmen de aire á $+15°$, temperatura que se atribuye al viento reinante, no pesará más que 1,293 kilógramos divididos por $1+at$ ó por $1+0{,}00367 \times 15 = 1{,}055$. Por consiguiente, el número de metros cúbicos de aire necesarios para la fusion de un metro cúbico de hielo será la expresion $\frac{930 \times 79{,}25 \times 1{,}055}{0{,}2375 \times 15 \times 1{,}293}$, si se supone que el aire mismo esté reducido á la temperatura de cero. El cálculo da 16,900 metros cúbicos próximamente. Si la temperatura del viento que produce la fusion es sólo de 10 y áun de 5 grados, el número de metros cúbicos necesarios será mayor: en una y otra hipótesis resultan 24,880 ó 48,900.

Vése por estas cifras qué enfriamiento debe resultar en la atmósfera de la inmensa cantidad relativa de calor invertida todos los años en la fusion de las nieves ó de los hielos. La radiacion solar es, á la verdad, de tal potencia que muy pronto restablece el equilibrio roto por estos cambios de calor entre el aire y el agua y por las variaciones de volúmen ó de densidad que suscitan en la masa movible de la envolvente aérea.

Si, segun acabamos de ver, las corrientes oceánicas ó aéreas que llegan de las regiones del ecuador á las zonas templadas y polares de cada hemisferio proporcionan á los climas correspondientes bastante calor para suavizar sus rigores, los hielos de los polos van á templar, por un procedimiento inverso, el extraordinario calor de la zona tórrida. Verdad es, segun despues veremos, que ciertas corrientes de sentidos opuestos existentes en el seno de los mares y del aire contribuyen á este resultado; pero aquí tan sólo consideramos el descenso de la temperatura procedente de la fusion del hielo. Sábese en efecto que al regresar el sol cada primavera, los glaciares y los campos de hielo de los polos sufren un deshielo que desprende de ellos masas considerables. Las islas flotantes llamadas *icebergs*, van á parar, arrastradas por las corrientes, á las regiones cálidas del Atlántico y del Pacífico, donde acaban por derretirse poco á poco, aunque no sin absorber para ello una gran cantidad de calor, sacado forzosamente en su mayor parte de las masas líquidas de dichos mares. Las dimensiones de estas moles de hielo llegan á veces á centenares de metros en todos sentidos, y sus volúmenes, á muchos millones de metros cúbicos. La fusion de uno de ellos exige pues un consumo de calor que puede representarse por millares de millones de calorias.

CAPITULO XII

PROPAGACION DEL CALOR. — CALOR RADIANTE

I

PROPAGACION DEL CALOR EN EL VACÍO: SU VELOCIDAD

Al describir los efectos del calor sobre los cuerpos, efectos que modifican su volúmen ó cambian su estado físico, no hemos dicho nada acerca del modo cómo pasa el calor desde el foco al cuerpo caldeado. Cuando dos cuerpos están en presencia, ya en contacto ó bien á alguna distancia, hay entre ellos cambio de calor, segun lo prueba la experiencia, por poco desiguales que sean sus temperaturas, de suerte que cada uno de ellos es un foco de calor para el otro; pero las más de las veces se da el nombre de foco ó manantial de calor al cuerpo de temperatura más alta. Lo que ahora tenemos que estudiar son los varios modos de propagacion del calor cuando pasa de un foco á un cuerpo más ó ménos distante de él, ó se propaga por distintos medios.

La experiencia nos enseña que el calor se propaga de dos modos: véanse algunos ejemplos de cada uno de estos, que podríamos multiplicar fácilmente, con arreglo á las observaciones que tenemos ocasion de hacer diariamente. Cuando tenemos en una mano el extremo de una barra de hierro fria y ponemos al fuego el otro extremo, trascurre cierto tiempo ántes que sintamos el calor del foco, al propagarse sucesivamente á lo largo de la barra; cuanto más corta es ésta, más breve tambien es el espacio de tiempo, y por otra parte la intensidad del calor así propagado va creciendo á partir del momento de la primera impresion si se mantiene la barra en el foco. Aquí el calor ha caminado á lo largo del metal y de molécula en molécula; por intermedio de las partes materiales ha ido así á parar de una punta á otra de la barra de hierro hasta trasmitirse á la mano por contacto. Tal es un ejemplo de propagacion del calor por conductibilidad. De este mismo modo crece la temperatura de las paredes de una vasija cuando se echa en ella agua caliente.

Pero no sucede lo propio cuando el calor de un cuerpo incandescente se comunica al rostro de la persona que quita de pronto la pantalla interpuesta entre ella y el foco calorífico. Entónces la rapidez de la impresion sentida nos prueba que el calor no se ha propagado calentando poco á poco el aire interpuesto entre el fuego y el rostro, sino en virtud de un modo de movimiento análogo al de la luz emanada de un foco luminoso. En este caso se dice que el calor se propaga por *radiacion*, y se da el nombre de *calor radiante* al emitido por los focos mediante este modo de trasmision á mayor ó menor distancia.

En resúmen, cuando delante y á cierta distancia de un cuerpo hay un manantial de calor, puede elevar éste la temperatura de aquél de dos modos: ó calentando sucesivamente molécula por molécula, todas las partes materiales interpuestas entre uno y otro, ó trasmitiéndole directamente su calor, sin que la elevacion de temperatura de las partes intermedias sea condicion precisa para que se eleve la del cuerpo. El calor se propaga por *conductibilidad* en el primer caso, por *radiacion* en el segundo.

Como los demás modos de propagacion del calor pueden referirse á uno ú otro de estos ó á su combinacion, vamos á estudiar cada uno de ellos separadamente. Empecemos por el calor radiante.

La accion de los rayos solares, que se nota á 37 millones de leguas kilométricas de distancia, prueba que el calor no necesita de un medio ponderable para propagarse, y en realidad, cuando atraviesa la atmósfera y llega á la su-

perficie del suelo, despues de cruzar los espacios interplanetarios, lo caldea directamente, sin haber elevado de un modo sensible la temperatura de las capas superiores del aire, como lo prueba el frio que reina en las altas regiones de la atmósfera y en las cumbres de las montañas.

El calor irradia de todos los cuerpos incandescentes que podemos observar en la superficie de la Tierra, del mismo modo que el calor emanado del Sol. El calor oscuro goza tambien de la misma propiedad, es decir, se propaga desde un punto cualquiera del foco á cualquier distancia por radiacion directa, sin que el caldeo de los puntos intermedios sea una condicion de la propagacion. Un experimento de Rumford ha puesto este resultado fuera de duda. Este físico construyó un barómetro terminado por su parte superior en un globo en el cual penetraba la bola *a* de un termómetro y que de este modo formaba la cámara barométrica del instrumento, de suerte que su capacidad estaba enteramente vacía de materia ponderable (fig. 100). Habiendo entónces cerrado al soplete y separado el globo, metió su parte inferior en agua hirviendo, y al punto subió el termómetro, efecto que no podia atribuirse más que á la radiacion en el vacío del calor comunicado por el agua á la pared interior del globo. Por otra parte, el caldeo producido por tal manera no puede atribuirse á la propagacion del calor por el tubo del termómetro, pues si se repite el experimento metiendo únicamente en el agua este tubo, se ve que pasa mucho más tiempo para que suba el mercurio, y áun que éste no llega á tanta altura.

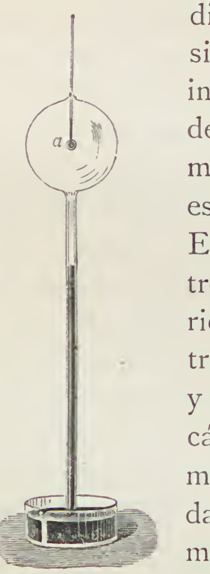


Fig. 100. — Radiacion del calor oscuro en el vacío

Newton habia hecho mucho ántes que Rumford un experimento muy parecido. Hé aquí cómo lo describe en su *Optica:* «Si, despues de suspender en dos anchos y largos vasos de vidrio invertidos dos pequeños termómetros de modo que no toquen los vasos, y despues de extraer el aire de uno de estos se los trasporta á ambos desde un sitio frio á otro caliente, el termómetro que estaba en el vacío se pondrá tan caliente y casi tan pronto como el del vaso lleno de aire. Si se vuelve á trasladar en seguida á los dos vasos á un sitio frio, el termómetro que está en el vacío se enfriará casi al mismo tiempo que el otro.»

Benedicto Prevost ha hecho varios experimentos para demostrar la radiacion del calor oscuro, colocando el cuerpo caliente en el foco de un espejo cóncavo, y un termómetro en el de un espejo conjugado, el cual marcaba una elevacion de temperatura que sólo podia atribuirse á la conductibilidad del aire interpuesto. Esta elevacion subsistia en efecto, cuando el operador interponia entre el termómetro y el foco una pantalla de vidrio animada de un rápido movimiento de rotacion, ó bien un chorro de agua fria que se renovaba de contínuo.

El calor radiante, lo propio que la luz, se propaga en línea recta por los medios homogéneos; por consiguiente, si entre un manantial de calor y una de las bolas del termómetro diferencial de Leslie se interpone una serie de pantallas cada una de ellas con un agujero, el instrumento no marcará elevacion alguna de temperatura sino cuando todos los agujeros estén en línea recta.

La velocidad de propagacion del calor radiante parece ser del mismo género que la de la luz. Su trasmision en la superficie de la Tierra es instantánea; por lo ménos jamás se ha podido comprobar ningun intervalo de tiempo apreciable entre el momento en que se retira una pantalla que intercepta un haz de rayos caloríficos y el en que empieza á producir su efecto en los termoscopios más sensibles. Verdad es que los experimentos de esta clase hechos por Pictet despues, lo fueron á distancias muy cortas (100 metros, y 23 próximamente); pero más adelante veremos que hoy se admite generalmente que la radiacion del calor se efectúa como la de la luz, por el intermedio de las ondulaciones del éter; que entre las ondulaciones caloríficas, lo propio que entre las luminosas, sólo hay diferencias de longitud de onda ó de velocidad del movimiento vibratorio; y además, que todas las leyes que rigen los fenómenos de la luz tienen tambien su comprobacion ó su aplicacion en las del calor radiante. Dedúcese de aquí que la velocidad de propagacion de este es la misma que la de la luz ó sea 300,000 kilómetros por segundo.

¿Es tan rápida la radiacion procedente de los focos de calor oscuro como la que emana de los del luminoso? Ningun experimento permite afirmarlo ó negarlo; lo único que se sabe es que las radiaciones de un mismo foco, luminoso ú oscuro, no son simples por lo comun, sino que comprenden rayos de calidades distintas; además, los focos que, como el Sol y los cuerpos incandescentes, irradian calor luminoso, emiten simultáneamente radiaciones oscuras. Es pues más que probable que el calor oscuro se propague por radiacion con la misma velocidad que el luminoso.

Oscuro ó luminoso, el calor de cualquier foco irradia por igual en todos sentidos; su intensidad decrece, así como la de la luz, en razon inversa del cuadrado de la distancia del foco. Todo cuerpo se enfria al irradiar calor; pero la rapidez con que su temperatura baja cierto número de grados depende de la naturaleza de la sustancia, del estado de su superficie, de suerte que los diferentes cuerpos tienen poderes radiantes ó *emisivos* distintos. Al dar en la superficie de un cuerpo el calor emanado de un foco por vía de radiacion, sufre en ella los mismos cambios que la luz; una parte se refleja y en seguida vuelve al medio que habia atravesado; otra es absorbida, dependiendo tambien de la naturaleza del cuerpo y del estado de su superficie la proporcion mayor ó menor de ambas cantidades de calor, y constituyendo así lo que se llama *poder reflector* y *poder absorbente* del cuerpo. En todo esto suponemos que el calor irradia en el vacío, ó, si este medio es ponderable, que los rayos caloríficos lo atraviesan sin calentarlo. Melloni ha dado el nombre de *diatermanos* ó *diatérmicos* á los medios materiales, gaseosos, líquidos ó sólidos que tienen la propiedad de dar paso al calor radiante sin que se modifique sensiblemente su temperatura, del mismo modo que llamó *atermanos* ó *adiatérmicos* á los cuerpos que el calor radiante no puede atravesar. Pero ya veremos que no se pueden tomar en absoluto estas propiedades y las denominaciones que las corresponden, pues hay sustancia que siendo atermana cuando tiene cierto espesor, se torna diatermana hasta cierto punto si dicho espesor es menor. Como se ve, es una nueva analogía con la luz, respecto de la cual los cuerpos son más ó ménos trasparentes, diáfanos ú opacos.

Al pasar los rayos de calor de un medio á otro de densidad diferente, sufren en su direccion una desviacion análoga á la de los rayos de luz, se refractan, fenómeno que, segun veremos, se manifiesta lo mismo con el calor oscuro que con el luminoso. Por último, el calor, así como la luz, posee la propiedad de la doble refraccion y la polarizacion.

Vamos á ocuparnos sucesivamente de todos estos fenómenos de emision, reflexion, absorcion y refraccion del calor, describiendo los principales experimentos gracias á los cuales se han conocido sus leyes.

II

INTENSIDAD DEL CALOR RADIANTE: SUS VARIACIONES

Como el calor que irradia de un foco ó manantial calorífico se propaga en línea recta y en todos sentidos, lo propio que la luz, su intensidad varía con arreglo á las mismas leyes que la luminosa; está en razon inversa del cuadrado de las distancias, y para una misma distancia es proporcional al coseno del ángulo que forma la direccion de los rayos de calor con la normal á la superficie de que emanan ó sobre la que caen.

Demuéstranse estas leyes por el raciocinio así como por la experiencia. Para el primer modo de demostracion, remitimos al lector al capítulo de La luz en que se ha tratado de esta misma cuestion con relacion á los rayos luminosos. En cuanto á la demostracion experimental, se hace con el auxilio de la pila termo-eléctrica de Nobili. Pero ántes de decir en qué consiste, debemos reproducir aquí la descripcion de este aparato, tal como la hemos dado en el tomo III del Mundo físico, advirtiendo de paso que Melloni hace constante uso del *termo-multiplicador* para el estudio de las diversas propiedades del calor radiante.

La pila termo-eléctrica de Nobili se compone de lo siguiente: Una serie de barras de antimonio AAA... soldadas punta con punta á unas barras de bismuto BBB... de igual longitud que aquellas, está plegada de tal suerte (figura 101) que todas las soldaduras pares se hallan á un mismo lado y las impares á otro. Uniendo ambas series por medio de dos alam-

bres que parten de las barras extremas, se tiene un circuito en el cual nacerá una corriente eléctrica tan luégo como haya una diferencia de temperatura entre las soldaduras opuestas. Se agrupa cierto número de elementos semejantes dando al grupo la forma de un prisma rectan-

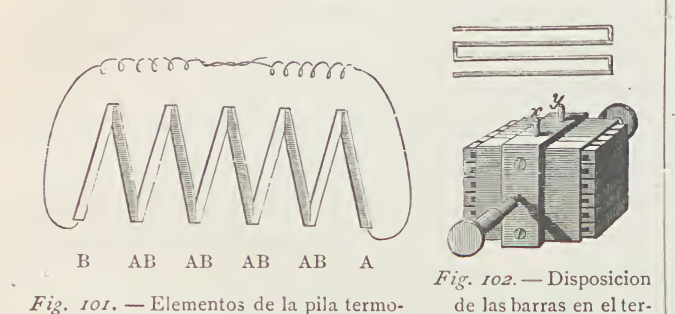


Fig. 101. — Elementos de la pila termo-eléctrica de Nobili

Fig. 102. — Disposicion de las barras en el termo-multiplicador

gular (fig. 102), cuyas dos caras opuestas contienen, la una todas las soldaduras pares de las barras y la otra todas las impares, y hacen las veces de reóforos de esta pila dos bornas fijas en dos caras laterales del prisma, una de las cuales comunica con la primera barra de bismuto, y la otra con la última de antimonio.

Cuando se quiere hacer uso de la pila de Nobili para estudiar la radiacion calorífica, se reunen los dospolos con un galvanómetro (figura 103), y se resguardan las caras de la pila de las variaciones irregulares de temperatura con cubiertas de laton de forma prismática, provistas de unos orificios que se abren y cierran á beneplácito. Apénas actúa un foco de calor sobre una de las caras de la pila, se engendra una corriente y se observa una desviacion en la aguja del galvanómetro. La direccion de la desviacion depende de cuál sea la cara calentada, y su amplitud marca la intensidad de la corriente que á su vez puede servir para determinar la diferencia de temperatura de las caras del aparato. La pila termo-eléctrica constituida de este modo es un instrumento sumamente sensible; basta tocar con el dedo una de sus caras, ó hacer llegar á él por insuflacion una bocanada de aire caliente, para que la aguja imantada sufra una fuerte desviacion.

En igualdad de circunstancias, la intensidad de la corriente está en razon del número de soldaduras, es decir, de elementos de la pila, por cuya razon se da al aparato de Nobili el nombre de *termo-multiplicador*.

Veamos ahora cómo se consigue comprobar

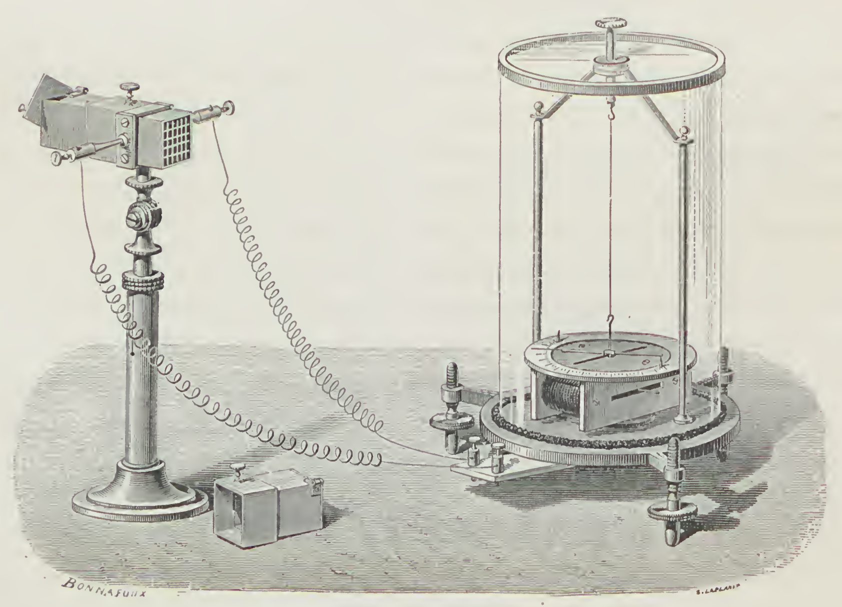


Fig. 103.—Pila termo-eléctrica ó termo-multiplicador de Nobili

con él la ley de la variacion de la intensidad en razon inversa del cuadrado de las distancias. El experimento siguiente, hecho por Melloni, demuestra de un modo muy sencillo la exactitud de esta ley.

Se pone en una de las caras de la pila termo-eléctrica un cono que limita las dimensiones del haz calorífico, y que, forrado interiormente de papel negro, no puede reflejar el calor susceptible de caer oblicuamente sobre su superficie interna. Como foco de calor radiante, se usa un vaso de hojalata con una de sus caras dada de negro de humo y lleno de agua hirviendo; la radiacion de esta cara hácia la pila será la que

nos sirva para verificar la ley. Colócase la pila provista de su cono enfrente de la vasija, á una distancia dada S O (fig. 104), y al punto se desvía la aguja del galvanómetro cierto número

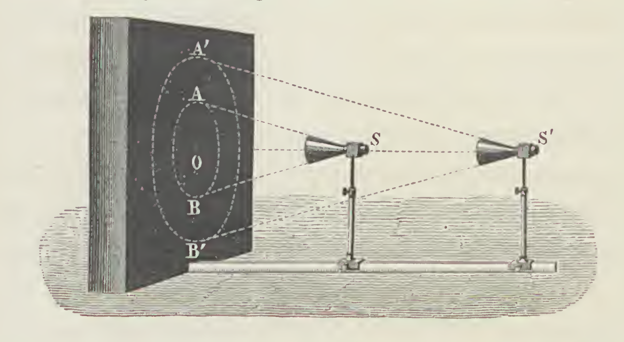


Fig. 104.—La intensidad del calor radiante varía en razon inversa de los cuadrados de las distancias. Demostracion práctica.

de grados, 54° por ejemplo. Se traslada la pila á doble distancia S'O; la posicion de la aguja subsiste invariable; continúa marcando 54°, sucediendo lo propio á cualquier otra distancia. Así pues, el efecto total de la radiacion es el mismo en cada una de estas posiciones; pero las partes de la superficie de la vasija que envian rayos de calor al cono no son otra cosa sino las secciones del cono del aparato prolongadas hasta la superficie radiante; cualquier punto de una de estas secciones irradia directamente sobre la cara de la pila vuelta hácia él, del propio modo que cualquier rayo emitido por el mismo punto sobre la superficie interna ennegrecida, y *á fortiori* fuera de ella, no puede llegar á esta misma cara. Pero estas secciones son cada vez mayores; son círculos cuyos diámetros AB, A'B' crecen proporcionalmente á la distancia de la pila á la vasija, y cuyas superficies van por lo tanto creciendo como los cuadrados de estas mismas distancias. Así pues, para que el efecto producido en la pila sea constante es preciso que la intensidad de la radiacion disminuya en razon de dichos cuadrados. En una palabra, la disminucion de la intensidad con la distancia compensa exactamente el aumento de la superficie radiante eficaz, quedando así la ley demostrada.

Supongamos ahora que, sin variar la distancia de la pila termo-eléctrica al foco, se cambia la inclinacion de la superficie radiante; que la cara *c a* (fig. 105), que envia un haz limitado de calor cuyos rayos salen perpendicularmente, está inclinada en *c' a'*. Si la aguja del galvanómetro sufre en el primer caso una desviacion de 60°, en el segundo marcará los mismos. En una palabra, la desviacion no variará, cualquiera que sea la oblicuidad de los rayos emitidos. Por consiguiente, la cantidad de calor radiado hácia la cara de la pila es tambien constante. Pero la porcion *c' a'* de la superficie que emite el haz oblícuo es mayor que la *c a* que emite el perpendicular. Es pues menester que la intensidad del calor emitido oblícuamente sea menor que la del radiado perpendicularmente. Para que haya compensacion, la razon de estas intensidades debe ser inversa de las dimensiones de las superficies, es decir, de las líneas *c' a'* y *c a*, ó directamente proporcional á *c a* y *c' a'*. En una palabra, la intensidad del calor emitido oblicuamente varía como el *coseno* del ángulo que forman los rayos con la perpendicular *om* á la superficie radiante.

Esta ley, formulada en principio por Lambert, la demostró Leslie con el aparato de su cubo y de su termómetro deferencial, una de

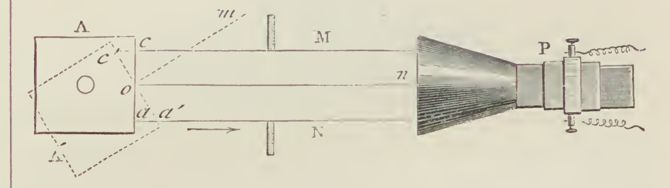


Fig. 105.—Ley de los cosenos para los rayos emitidos oblicuamente

cuyas bolas estaba situada en el foco de un espejo esférico, aparato de que en breve nos ocuparemos. Pero sus experimentos no comprobaron la ley sino en el caso de que la superficie estuviese dada de negro de humo, es decir, desprovista de todo poder reflector. Y en efecto, posteriormente se ha reconocido que la ley del coseno no es exacta sino en este caso excepcional. La Provostaye y Desains la han comprobado con la pila de Nobili, que marcaba una desviacion constante si la superficie radiante era el negro de humo, al paso que en otras sustancias, como el vidrio, la cerusa ó el ocre rojo, la desviacion de la aguja galvanométrica variaba con la oblicuidad de los rayos de calor. Esta inexactitud de una ley que parece poder deducirse de un solo raciocinio tiene su explicacion. Los rayos de calor que emite la superficie de un cuerpo al pasar del interior al exterior por la superficie sufren dos reflexiones, una interna y otra externa, y el calor emitido es tan

sólo la diferencia entre el calor total que llega á la superficie y la porcion que, reflejada interiormente, vuelve al cuerpo, y que varía probablemente con la inclinacion como varía en efecto el calor exteriormente reflejado.

Por lo que hace á la ley del coseno aplicada

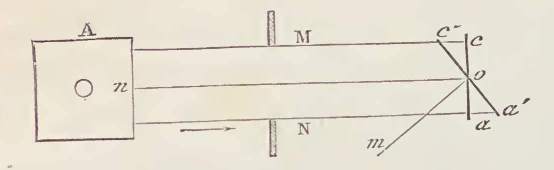


Fig. 106.—Ley del coseno para los rayos recibidos oblicuamente

á la intensidad del calor radiante emitido por un foco A y recibido oblicuamente por la superficie *c' a'*, es una simple consecuencia geométrica de la variacion de las superficies interceptadas en un haz limitado, cuando varía la oblicuidad del plano de seccion. No hay lugar á comprobarla experimentalmente.

III

REFLEXION DEL CALOR

Cuando los rayos de calor dan en la superficie de un cuerpo, ó en términos más generales, cuando llegan á la superficie de separacion de dos medios diferentes, su haz se divide en dos partes; una de ellas penetra en el interior del cuerpo ó del segundo medio, donde se divide á su vez en calor trasmitido y en calor absorbido, atravesando la primera el cuerpo sin calentarlo, y siendo la segunda capaz de modificar su temperatura. La segunda parte del haz incidente vuelve al medio de donde procede; como la luz, sufre una reflexion. Ya hemos dicho que las leyes de esta reflexion son las mismas para los rayos de calor que para los luminosos, es decir, que *el rayo incidente y el reflejado están en un plano perpendicular á la superficie reflectora y forman el mismo ángulo con la normal en el punto de incidencia.* La comprobacion experimental de esta identidad se suele hacer del modo siguiente:

Se ponen dos espejos parabólicos cóncavos, de laton bruñido, uno enfrente de otro, de modo que sus ejes principales coincidan (fig. 107). En el foco de uno de ellos se coloca un manantial calorífico, por ejemplo un cestillo de alambre que contenga brasas, y en el foco del otro una sustancia inflamable, como yesca, algodon-pólvora ó pólvora. Al poco rato sobreviene la inflamacion; pero el experimento no sale bien si se pone la sustancia inflamable fuera del foco, áun cuando se la acercara al manantial calorífico. Semejante efecto es enteramente parecido al de la reflexion de la luz en las mismas condiciones, y sólo puede explicarse por la reunion y concentracion de los rayos de calor partidos del primer foco. Su haz divergente cae sobre la superficie bruñida del primer espejo, se refleja en ella, se trasforma en un haz paralelo al eje comun, se refleja de nuevo en la superficie del segundo espejo y va á converger en el foco de éste. En una palabra, los rayos de calor siguen despues de su reflexion el mismo camino que habrian seguido los luminosos emanados del

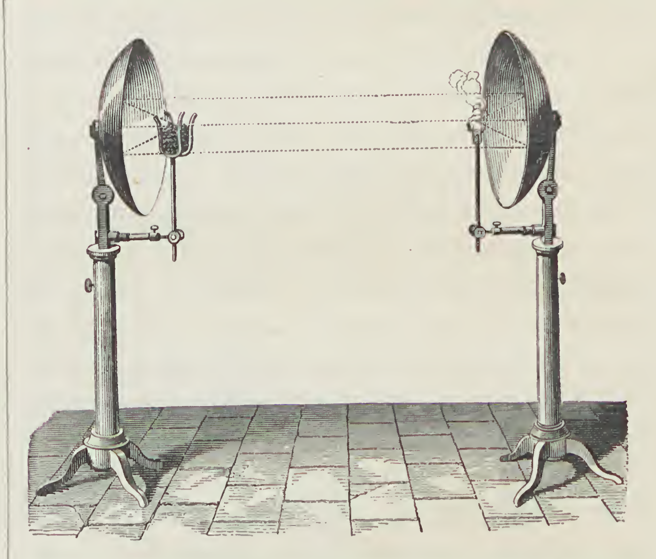


Fig. 107.—Reflexion del calor: experimento de los espejos parabólicos

mismo punto, y las propiedades geométricas de la parábola dan por consecuencia las dos leyes anteriormente formuladas: 1.ª la coincidencia del rayo incidente y del reflejado en un mismo plano perpendicular á la superficie reflectora; 2.ª la igualdad de los ángulos de incidencia y reflexion.

El experimento de los espejos parabólicos se hace de varios modos. Por ejemplo, se puede poner en uno de los focos una bola metálica sumamente caliente, y en el otro el depósito de un pequeño termómetro. La columna mercurial sube al punto, al paso que el efecto es nulo si el termómetro no está colocado exactamente en el foco. En lugar de un termómetro comun se hace uso tambien de una de las bolas del termoscopio de Rumford ó del termómetro

diferencial de Leslie, con lo cual se evitan las variaciones de temperatura por que pueda pasar el medio durante el experimento, puesto que las dos bolas del instrumento están sometidas por igual á su influencia. De este modo se tiene la seguridad de que las variaciones indicadas proceden únicamente de la reflexion. Compréndese asimismo que la pila termo-eléctrica de Nobili desempeñaria no ménos bien este cometido, marcando con la desviacion instantánea de la aguja del galvanómetro la concentracion de los rayos reflejados en el espejo del segundo foco.

Los espejos parabólicos presentan la ventaja de la grande abertura que puede dárseles y que permite colocarlos á gran distancia uno de otro. Claro está que el experimento anterior no dejará de salir bien si en lugar de ellos se ponen dos espejos esféricos, y áun uno solo, con tal de colocar el cuerpo caldeado (ó la sustancia inflamable) y el termómetro en dos puntos del eje que sean dos de los focos conjugados; y áun esta disposicion es más ventajosa, por cuanto los rayos de calor sólo experimentan una reflexion y por consiguiente no disminuye tanto su intensidad.

Los experimentos que acabamos de relatar se hacen al aire libre; pero Davy ha efectuado otro que prueba que las leyes de la reflexion del calor son las mismas en un medio imponderable. Debajo del recipiente de la máquina neumática se ponen dos espejitos esféricos ó parabólicos, de laton bruñido y plateado, cuyo eje comun es vertical. En el foco del espejo inferior se fija la bola de un pequeño termómetro, y en el del superior un alambre de platino muy fino enrollado en espiral. Los extremos del hilo están soldados á los reóforos de una pila, y empalmados á los tubos laterales de la campana que forma el recipiente. Hecho el vacío en éste, se cierra el circuito, y al pasar la corriente de la pila por la espiral de platino, la pone incandescente. Al punto marca el termómetro un aumento muy sensible de temperatura, que sólo puede atribuirse á la reflexion del calor desarrollado. Y en efecto, si se repite el experimento despues de desviar la bola del termómetro, la elevacion de temperatura marcada por éste es mucho más débil, cuando no enteramente nula.

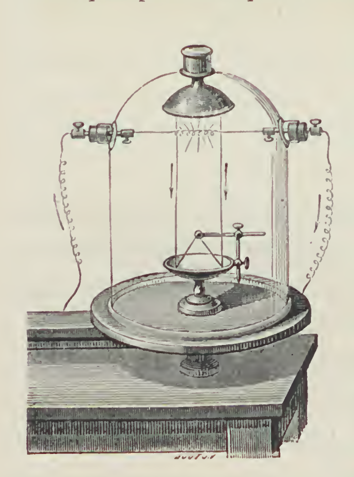


Fig. 108.—Experimento de Davy: reflexion del calor en el vacío

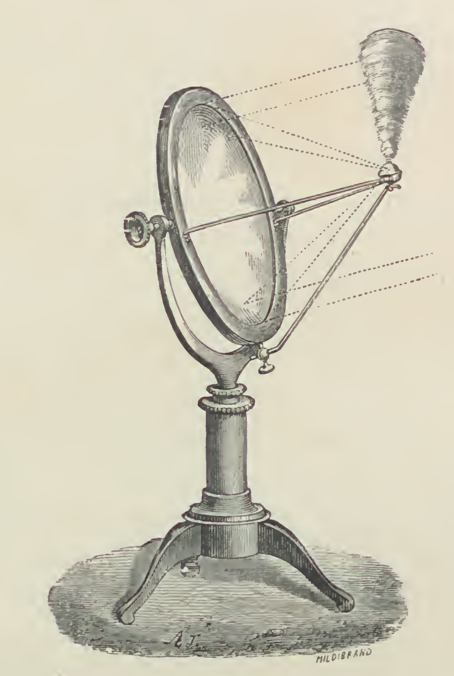


Fig. 109.—Espejo ustorio

Mencionemos tambien un curioso experimento que prueba que hay radiaciones frigoríficas como las hay de calor. Si se reemplaza uno de los focos de calor de que hemos hecho mérito con un pedazo de hielo, colocándolo exactamente en el foco de uno de los espejos, al punto baja el termómetro del otro espejo, como si hubiera habido una reflexion de frio. La verdad es que en este caso, como en todos los demás, hay en presencia dos cuerpos á temperaturas desiguales, y ambos irradian calor. De aquí resulta para cada uno de ellos una pérdida de calor, compensada en parte por la ganancia que resulta de la radiacion del otro. En el primer experimento, el termómetro recibia más de lo que perdia, de lo cual resultaba un aumento de temperatura y la consiguiente elevacion del mercurio. En el experimento hecho con el trozo de hielo, el termómetro es el que pierde más calor del que recibe, y por lo tanto su temperatura disminuye y el nivel termométrico baja.

Se han utilizado las leyes de la reflexion del calor para obtener uno de gran intensidad en

el foco de un espejo esférico cóncavo expuesto á los rayos solares. Con un aparato de esta clase, llamado *espejo ardiente ó ustorio*, y al cual se da mucha abertura y un radio de curvatura considerable, se han fundido metales, vitrificado ladrillo, piedra, etc. Volveremos á ocuparnos más detalladamente de este asunto, cuando tratemos de las aplicaciones industriales del calor solar y de los aparatos inventados recientemente con objeto de utilizarlo.

IV

PODER EMISIVO DE LOS CUERPOS: PODER ABSORBENTE, PODER REFLECTOR

Para los rayos de calor, lo propio que para los de luz, hay dos clases de reflexiones experimentadas por un haz al caer, con una incidencia cualquiera, sobre la superficie de un cuerpo; la reflexion *regular* corresponde á la parte del haz que retrocede con arreglo á las leyes enunciadas en el artículo precedente, dándose el nombre de *calor difuso* á la porcion que retrocede con irregularidad en todos sentidos, y comprendiéndose con el de *difusion* el fenómeno de esta reflexion irregular. Con respecto á la parte que queda del calor recibido por el cuerpo, penetra en su interior ó es *absorbida*, si se trata de una sustancia *atermana;* y puede ser en parte absorbida y en parte *trasmitida*, si la sustancia es, por el contrario, *diatermana.*

Las proporciones de estas diferentes cantidades de calor varian de un cuerpo á otro con arreglo á ciertas condiciones que no tan sólo dependen de su naturaleza y del estado de su superficie, sino tambien, segun veremos, del calor mismo que recibe, tanto en razon de su temperatura como de la *calidad de sus rayos*, expresion que en breve tendremos ocasion de explicar y definir. Representando por la unidad ó por el número 100 (se escoge cualquiera de ambos) la cantidad total de calor radiante recibida por un cuerpo, se llega á determinar experimentalmente cada una de las partes en que se descompone el haz recibido, y cada uno de los números que resultan representa un *poder* propio del cuerpo. De este modo se tiene: 1.º el *poder reflector* correspondiente á la porcion de calor reflejada con regularidad; 2.º el *poder difuso*, para el calor difuso; 3.º el *poder absorbente*, para el que, penetrando en el cuerpo, eleva su temperatura; 4.º y último, el *poder diatermano*, que comprende el calor que lo atraviesa sin calentarlo.

En la definicion que acabamos de dar se trata de los poderes *absolutos* propios de cada sustancia; siendo obvio que si fuese posible medir cada uno de ellos con rigurosa exactitud, la suma de los cuatro números así obtenidos en las mismas condiciones experimentales seria precisamente igual á 1 ó á 100. Pero tambien se puede considerar cada uno de estos poderes como relacionándolo con el de un cuerpo especialmente escogido, y entónces las cifras que se obtienen indican los poderes *relativos.* Cuidaremos de distinguir estas dos clases de determinaciones.

Se ha de considerar por último la mayor ó menor facultad que tienen los cuerpos de irradiar ó emitir calor cuando su temperatura excede á la de los cuerpos que los rodean ó á la del recinto en que se hallan. Mas para comparar por este concepto los diferentes cuerpos y averiguar lo que se ha convenido en llamar sus *poderes emisivos* es necesario hacer los experimentos á una misma temperatura y que la emision del calor se efectúe en iguales condiciones de inclinacion; es preciso en fin que la naturaleza ó la calidad del calor radiante sea idéntica. Se toma generalmente por unidad el poder emisivo del negro de humo, único cuerpo cuyos poderes reflector y emisivo puedan considerarse nulos.

Sentadas estas definiciones, veamos cómo se ha procedido á averiguar y determinar experimentalmente estos poderes. Empecemos por el emisivo.

Rumford y Leslie hicieron las primeras investigaciones acerca de este punto, las cuales datan de principios del siglo actual. Llenando de agua caliente una vasija metálica colgada en un recinto de temperatura constante, Rumford observaba con un termómetro metido en la vasija el enfriamiento experimentado por el líquido en un minuto. Volvia á empezar el experimento cambiando la superficie de la vasija, pero partiendo siempre del mismo exceso de temperatura del agua sobre la ambiente. De este modo vió que el enfriamiento es más rápido cuando la superficie está ennegrecida, más lento si esta

es metálica, y por regla general, que esta rapidez variaba con la naturaleza ó estado de la superficie, deduciendo de aquí que el poder emisivo cambia con este estado; pero las cifras halladas por Rumford no podian servir para medir el poder emisivo, porque el enfriamiento de la vasija no dimanaba solamente de la radiacion, sino tambien del contacto de las capas de aire que la rodeaban.

Leslie hizo por la misma época otros experimentos más concluyentes, merced á un método en el que sólo influia la radiacion. Como foco de calor de temperatura constante usaba una vasija metálica de forma cúbica llena de agua hirviendo en cuyo estado procuraba mantenerla. Las caras del cubo estaban formadas ó forradas de las varias sustancias cuyo poder emisivo se queria poner á prueba, como placas de plata, cobre ó estaño bruñido, capas de negro de humo, blanco de cerusa, etc. A distancia invariable del cubo ponia una de las bolas de su termómetro diferencial, resguardando la otra de la radiacion con una pantalla, y dirigia sucesivamente la radiacion directa de cada cara del cubo sobre la bola del termómetro. Entónces anotaba los excesos de temperatura marcados por este instrumento tan luégo como se detenia, y admitiendo que estos excesos sean proporcionales á las intensidades del calor recibido por la bola, ó del haz irradiado de cada cara del cubo, deducia de aquí los poderes emisivos relativos á los cuerpos que formaban dicha cara.

Para obtener efectos más marcados, colocaba

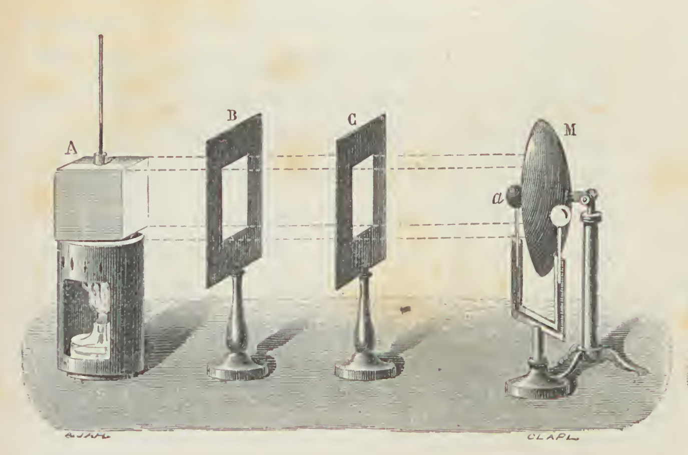


Fig. 110.—Medida de los poderes emisivos. Experimentos de Leslie

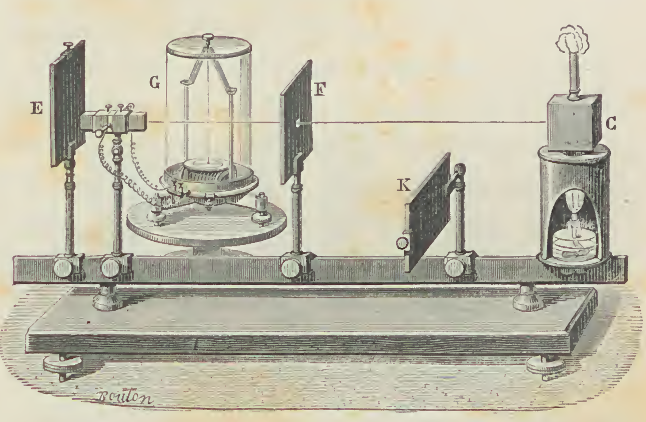


Fig. 111.—Medida de los poderes emisivos con el aparato de Melloni

Leslie detrás de la bola del termómetro diferencial un espejo esférico de laton bruñido, cuyo eje principal era perpendicular á la cara del cubo; teniendo además la bola y la cara en cuestion sus centros en dos focos conjugados del espejo. En la fig. 110 se ven dos pantallas con unas aberturas cuadradas que limitan el haz radiante, lo que en rigor no es indispensable; y en efecto, en cada experimento el calor radiado directamente ó por reflexion sobre el espejo forma siempre un haz cónico de abertura constante, igual para todas las caras, puesto que la distancia es invariable.

Leslie se convenció de que, en igualdad de circunstancias, el negro de humo es el cuerpo de mayor poder emisivo. A este seguian el agua, el papel de escribir, el lacre, el vidrio, la tinta de China, y en último lugar los metales, hierro, estaño, plata, cobre y oro.

Melloni se valió de la pila termo-eléctrica para determinar los poderes emisivos (1), pero la Provostaye y Desains han hecho los estudios más detenidos acerca de este asunto. Propusiéronse averiguar cómo varía la ley de emision

(1) Hé aquí las cantidades deducidas por Leslie, y luégo por Melloni, para varias sustancias:

SEGUN LESLIE

Negro de humo	100
Agua	100
Papel de escribir	98
Lacre	93
Vidrio	90
Tinta china	88
Hielo	85
Minio	80
Plombagina	75
Plomo mate	45
Mercurio	20
Plomo brillante	19
Hierro bruñido	15
Estaño, plata, cobre, etc.	12

con la temperatura, midieron el poder emisivo á 100° y á temperaturas mayores hasta 400°, y por último estudiaron la influencia de la superficie emitente en la naturaleza del calor emitido, así como la de la direccion de la emision en su intensidad. Vamos á resumir sucintamente los resultados obtenidos (fig. 111).

«La determinacion de los poderes emisivos á 100°, dice Desains, ha cambiado completamente las ideas formadas sobre su extension y alcance, al ménos por lo que atañe á los metales. Ha demostrado que hácia los 100°, el poder emisivo de la plata en láminas está comprendido entre 0,02 y 0,03; que el del oro es 0,04; el del platino 0,09 ó 0,10, segun los ejemplares; el de la plata mate, 0,05. Se ha averiguado tambien que el del ocre rojo es igual al del negro de humo, y el del azufre lavado de unos 0,73.

»Casi siempre se habia estudiado la emision á temperaturas próximas á 100°; tan sólo Dulong y Petit habian procurado llevar hasta los 300° la comparacion de los poderes emisivos del vidrio y de la plata, y creyeron poder deducir de los experimentos hechos entre estos límites que las relaciones entre los poderes emisivos de los cuerpos son constantes á cualquier temperatura. Los experimentos de la Provostaye y Desains han probado que no existe semejante circunstancia. Para comparar á 400° los poderes emisivos de los dos cuerpos citados, tomaron como manantial de calor una cuba de hierro, una de cuyas paredes era plana y lisa. En una de las mitades de esta cara pusieron negro de humo y en la otra la sustancia sujeta al experimento. La cuba estaba llena de aleacion constantemente removida, y desviando la pila paralelamente á sí misma, podia hacerse radiar hácia ella ya la una ó ya la otra de las dos sustancias cuyos poderes emisivos querian compararse.

»Elevando el calor al rojo, se tomaba por cuerpo radiante una placa de platino dada en sus dos mitades de diferentes sustancias y hecha incandescente por una corriente eléctrica constante.

»Operando así, se ha visto que, al rojo, el poder emisivo del borato de plomo equivale solamente á los 0,75 del óxido de cobre. Despues se ha reconocido que, á esta temperatura el poder emisivo del óxido de zinc sólo representa los 0,60 del del ocre; y sin embargo, á 100° estos cuatro cuerpos emiten calor en proporciones iguales. Respecto del platino, la variacion ocurre en sentido inverso: al rojo naciente, su poder emisivo es de 0,14, al paso que á 100° es de 0,10.»

Estos mismos físicos han visto que el calor emitido por el platino al rojo naciente atraviesa una lámina tenue de vidrio en la proporcion de 0,39; y que el que emite el borato de plomo en las mismas condiciones atraviesa la misma lámina en la proporcion de 0,22 solamente; de donde se debe deducir que la naturaleza de la superficie radiante influye en la calidad del calor emitido. Por último, han reconocido que la proporcion de los poderes emisivos cambia por lo comun con la direccion de la radiacion, y que el del vidrio, por ejemplo, es 0,9 del del negro de humo en direccion perpendicular, al paso que baja á 0,75 con una inclinacion de 70 grados.

V

REFLEXION DEL CALOR. — PODERES REFLECTOR Y DIFUSO DE LOS CUERPOS

Tambien ha hecho Leslie experimentos sobre el poder reflector de los cuerpos, habiendo determinado, no el absoluto, sino la relacion que media entre éste y el del laton bruñido tomado por unidad. Para ello concentraba en uno de los focos conjugados del reflector esférico N (fig. 112) los rayos de calor emitidos por un cubo lleno de agua hirviendo M, una de cuyas caras la ocupa el otro foco. Entre el primer foco y el reflector ponia una placa *a* del metal cuyo poder se proponia estudiar. El haz calorífico reflejado primeramente por la superficie esférica cóncava, pasaba de esta á la placa, y de aquí á una de las bolas del termómetro diferencial. Leslie tomaba nota de la elevacion de temperatura marcada por el instrumento, cuando el nivel del líquido se detenia en su movimiento ascendente. Luégo repetia el experimento cam-

---

SEGUN MELLONI

Negro de humo	100
Blanco de cerusa	100
Cola de pescado	91
Tinta china	85
Goma laca	72
Metales	12

biando cada vez la naturaleza de la placa reflejante. Siendo las indicaciones del termómetro proporcionales á las cantidades de calor recibidas por la bola, y por consiguiente á las que habian sido reflejadas por las diferentes sustancias, su relacion era igual á la de sus poderes reflectores. Hé aquí las cantidades deducidas por Leslie:

Laton.	100	Plomo.	60
Plata.	90	Estaño amalgamado.	50
Estaño en hojas. . .	85	Vidrio.	10
Estaño aplanado.. .	80	Vidrio dado de aceite.	5
Acero.	70	Negro de humo. . .	0

La comparacion de estos números con los que dan los poderes emisivos de los mismos cuerpos demuestra que el órden en que están clasificados aquí es precisamente inverso del que presentaban en el primer cuadro; así pues, los poderes emisivos están en razon inversa de los reflectores. Más adelante veremos que esta ley es la consecuencia natural de la igualdad del poder emisivo y del absorbente, por lo ménos en los cuerpos atermanos.

Con la pila termo-eléctrica de Melloni se pueden medir los poderes reflectores absolutos. Hé aquí la disposicion que con tal objeto han adoptado la Provostaye y Desains.

Las diferentes piezas usadas por Melloni para sus investigaciones sobre el calor radiante están montadas sobre unos soportes de corredera, y estos á su vez sobre una regla horizontal de cobre, sólida, bien recta y con una division merced á la cual se miden las distancias. En A (fig. 113) está el pié que lleva el foco de calor, que en la figura es una lámpara de Locatelli (1); y luégo hay dos pantallas B y C, una de ellas con una abertura para dar paso al haz calorífico. El soporte D tiene un círculo dividido en grados, y en él se sujeta perpendicularmente la placa reflectora, cuyo plano pasa por el centro del círculo. El pié de este soporte lleva una alidada HH′, movible alrededor de la vertical del centro del círculo graduado, y á esta alidada se fija la pila, cuyas caras están resguardadas por una pantalla de la radiacion directa.

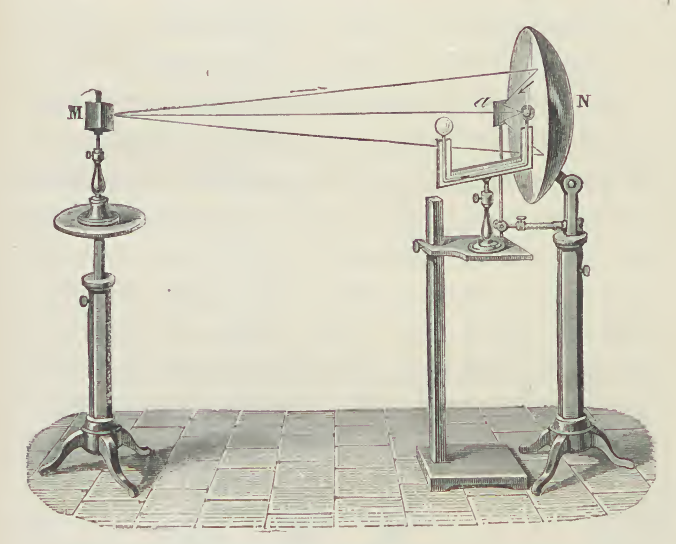


Fig. 112.—Medida de los poderes reflectores por el método de Leslie

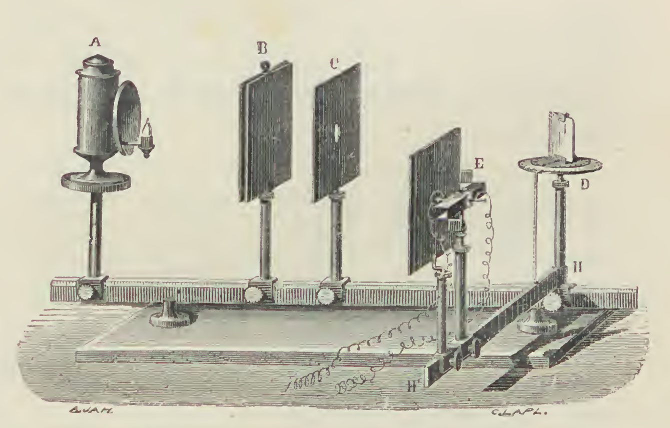


Fig. 113.—Medida de los poderes reflectores con el aparato de Melloni. Experimentos de la Provostaye y Desains

Para medir el poder reflector de una sustancia dada se empieza por poner la alidada y la pila en la prolongacion de la regla. Entónces se dirige el haz calorífico sobre la pila y se anota la desviacion de la aguja del galvanómetro, desviacion que servirá para medir la intensidad total del haz calorífico directo, á una distancia igual á la suma de las distancias de las dos reglas. Colócase entónces en el soporte D la placa ó el espejo de la sustancia cuyo poder reflector se quiere medir, poniéndola de modo que forme un ángulo dado con el rayo incidente. Hecho esto, se da vuelta á la alidada movible hasta que su direccion forme con la de la regla fija el mismo ángulo que esta con la placa. Bájase la pantalla B; el haz de calor cae sobre el espejo, se refleja en él, y despues de esta reflexion va á dar en la cara de la pila, produciendo una

(1) Es una lámpara compuesta de un depósito en que el aceite está siempre á nivel constante, y su mechero rectangular tiene una mecha de igual forma; la constancia de su llama y la carencia de una chimenea de vidrio la han hecho escoger con preferencia para manantial de calor luminoso. Está provista de un reflector parabólico.

desviacion, que comparada con la primera, marca la fraccion de calor reflejado.

Haciendo variar la incidencia y luégo la naturaleza del foco, la Provostaye y Desains han podido reconocer la influencia que resulta de estas variaciones con respecto á la cantidad de calor reflejada por una misma sustancia. Hé aquí algunos de los resultados obtenidos por dichos físicos:

De 100 rayos emanados de una lámpara de Locatelli, y que dieron, con una incidencia de 50º, sobre espejos formados de láminas bruñidas de metales comunes, la proporcion de los rayos reflejados ha sido la siguiente:

Metales	Poderes reflectores absolutos	Metales	Poderes reflectores absolutos
Plata.	97	Estaño.	85
Oro.	96	Acero.	83
Cobre.	93	Zinc.	81
Laton.	93	Platino bruñido.	80
Metal de los espejos.	86	Hierro.	77

El cuadro siguiente hace patente la influencia del foco:

Sustancias de los espejos	Lámpara Locatelli	Calor solar natural	Lámpara de alcohol salado
Plata.	97	92	»
Oro.	96	87	»
Metal de los espejos.	86	64	»
Acero.	83	60	88
Platino.	80	60	86
Laton.	93	»	95

Vese que, para una misma sustancia, el poder reflector disminuye cuando crece la temperatura del foco de calor, ó cuando disminuye en el foco el número de los rayos caloríficos que abundan en la emision de los cuerpos de baja temperatura. Es decir, en términos más generales, que la intensidad de la reflexion disminuye á medida que aumenta el grado de refrangibilidad. Así lo han reconocido los sabios operadores valiéndose de los rayos solares simplificados por su dispersion á través de los prismas de vidrio; y haciendo extensivas las mismas medidas á los rayos oscuros más refrangibles que el rojo, vieron en todos los metales ensayados que dichos rayos oscuros se reflejan en proporcion mucho mayor que el calor luminoso. El poder reflector del acero, que es 60 solamente para el calor solar natural, llega á 75 por 100 cuando este metal refleja el calor que procede de una banda del espectro oscuro, simétrica del azul con relacion al rojo extremo. Esta influencia de la naturaleza de los rayos en la intensidad de la reflexion es más marcada todavía respecto del vidrio y sustancias á él análogas. El vidrio no refleja más que el cuatro por ciento de los rayos solares á la incidencia normal: la proporcion llega al 10 respecto del calor emanado de placas ennegrecidas elevadas á 300º de temperatura.

La influencia de la inclinacion en la intensidad de la reflexion del calor es cosa no ménos bien averiguada. Segun Desains, el calor emanado de focos á 150º y 200º le ha dado las cifras siguientes, por lo que respecta al poder reflector del cristal:

Incidencias.	30°	45°	70°	75°
Poder reflector.	10	11	25	32

En todos los experimentos que dejamos enumerados, sólo se trata de la reflexion regular, de la que se efectúa en la superficie de cuerpos bruñidos con arreglo á la ley de la igualdad de los ángulos de incidencia y reflexion. Pero las superficies mates carecen de poder reflector regular apreciable. Unas, como el negro de humo (1), absorben casi todo el calor que va á parar á ellas: otras sólo absorben una parte y difunden el resto, esto es, diseminan los rayos de calor no absorbidos alrededor del punto de incidencia. La cantidad de calor difundida varía segun la naturaleza del calor radiante emitido, hecho comprobado por J. Herschel, y despues por Melloni. Posteriormente Knoblauch estudió la difusion de un haz calorífico complejo. «La Provostaye y Desains estudiaron á su vez el asunto desde otro punto de vista, procurando definir las leyes del calor difuso y medir la intensidad total de la difusion. Entre los resultados que obtuvieron, haremos mencion de los siguientes:

«1.º Cuando el calor encuentra en una direccion normal cuerpos enteramente mates, como la cerusa, el cromato de plomo, se difunde con

(1) Scheele hizo las primeras observaciones sobre la desigualdad del poder reflector segun el estado de las superficies. «Habiendo puesto un espejo cóncavo metálico y bruñido enfrente de la abertura de una estufa en la cual ardia un activo fuego de leña, dicho químico observó que el espejo reflejaba todo el calor que llegaba á su superficie, puesto que no se notaba que se hubiera calentado. Si se daba su superficie de negro de humo, el espejo se calentaba hasta el punto de no poderse poner impunemente la mano en la parte convexa.» (Despretz.)

arreglo á una ley que se puede enunciar como sigue:

»Si se cortan elementos iguales en una esfera que tenga su centro en una mancha luminosa formada por los rayos incidentes, cada uno de dichos elementos recibe cantidades de calor difuso respectivamente proporcionales á los cosenos del ángulo que forma con la normal el eje del haz que lo cubre.

»Una suma da entónces la cantidad total enviada por difusion, y por consiguiente, la absorbida. Operando con el calor solar natural, resulta que en la cerusa hay 82 rayos difusos sobre 100; y por lo tanto 18 rayos absorbidos; en el cromato, 66 rayos difusos y 34 absorbidos.

»2.º Hasta llegar á inclinaciones muy pronunciadas, se encuentra el máximum de difusion en la direccion de la normal, y no en lo que se suele llamar direccion de la reflexion regular.

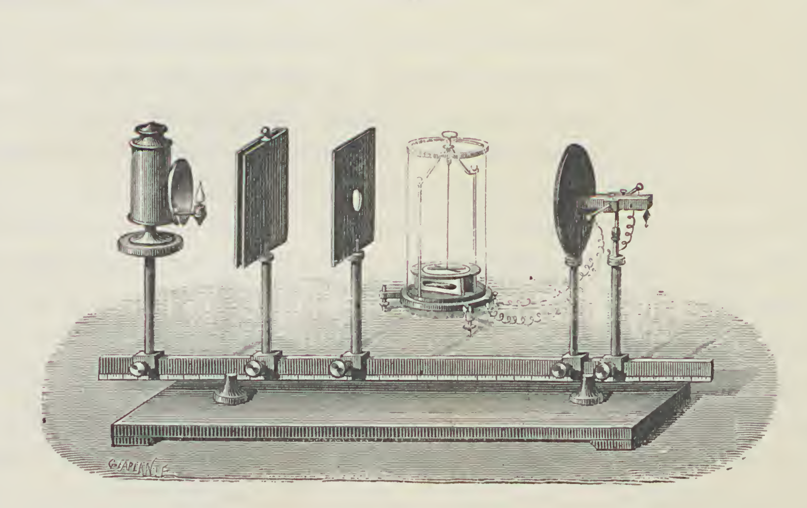
»3.º Para el platino y la plata en polvo, las leyes de la difusion son muy distintas de las de la cerusa.»

VI

PODER ABSORBENTE DE LOS CUERPOS.—IGUALDAD DEL PODER ABSORBENTE Y DEL EMISIVO

Para averiguar el poder absorbente, Melloni hacia uso de su aparato, disponiéndolo del modo siguiente (fig. 114): delante y á corta distancia de la pila termo-eléctrica ponia un disco de cobre muy delgado, con la superficie cubierta de la sustancia que queria estudiar y la cara posterior dada de negro de humo. El haz calorífico radiante caia sobre el disco y el calor absorbido se escapaba por el otro lado radiando hácia la pila, cuyas indicaciones mostraban los poderes absorbentes relativos de las sustancias sometidas á la prueba.

Leslie habia hecho experimentos con el mismo objeto, valiéndose del reflector del aparato representado en la figura 112. Colocado el cubo de agua hirviendo á corta distancia del reflector, ponia en el foco conjugado una de las bolas de su termómetro diferencial, cubriéndola


Fig. 114. — Medida del poder absorbente con el aparato de Melloni

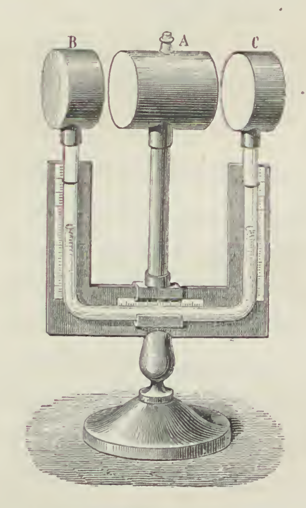


Fig. 115.—Experimento de Ritchie para demostrar la igualdad de los poderes emisivo y absorbente

sucesivamente con las sustancias cuyos poderes absorbentes relativos trataba de averiguar, como negro de humo, blanco de cerusa, hojas de oro, de plata, de cobre, etc. Leslie suponia que los excesos de temperatura marcados por su termómetro en sus diferentes experimentos eran proporcionales á los poderes absorbentes. Pero semejante hipótesis, deducida de la ley de Newton sobre el enfriamiento, no es aplicable en este caso, porque la ley en cuestion supone que el cuerpo que se caldea ó enfria conserva la misma superficie ó no cambia de naturaleza, al paso que la cubierta de la bola del termómetro diferencial variaba de un caso á otro en los experimentos de Leslie.

Cuando se trata de sustancias atermanas bien bruñidas, casi exentas de poder difuso, puede admitirse que todo el calor que reciben por vía de irradiacion, ó bien se refleja con irregularidad, ó bien queda absorbido. Por consiguiente, si se conocen los poderes reflectores de estas sustancias, deduciéndolos de la unidad ó de 100, la diferencia será la medida de su poder absorbente. Por el contrario, si se trata

de cuerpos mates, y la temperatura del foco de calor es muy elevada, se difundirá ó quedará absorbido todo el calor recibido. Si, conforme hemos visto ántes, se ha calculado el poder difuso, se le deducirá asimismo de la unidad ó de 100, y la diferencia será la medida del poder absorbente del cuerpo. Operando de este modo, han averiguado la Provostaye y Desains los poderes absorbentes de varias sustancias respecto del calor emanado de varios focos con una incidencia próxima á la normal. Hé aquí algunas cifras sacadas de sus experimentos:

PODERES ABSORBENTES

Vidrio y metales bruñidos	Calor solar	Lámpara Locatelli	Lámpara moderador
Vidrio..	96,5	»	95,5
Acero..	42	17,5	34
Metal de espejos. .	34	14,5	30
Platino.	39	17	30
Oro.	13	4,5	»
Plata.	8	2,5	3,5
Cuerpos mates			
Cerusa.	18	»	»
Cromato de plomo..	34	»	»
Polvo de plata. . .	24	»	»

Los mismos físicos han aconsejado un método directo para averiguar el poder absorbente de cualquier cuerpo, ó por lo ménos la relacion de los poderes absorbentes de dos sustancias. Empleando al efecto un termómetro muy sensible, cubrian la bola con las sustancias que iban á estudiar, las exponian en cada caso y del mismo modo á la radiacion de un foco constante, anotaban los excesos estacionarios de temperatura y tomaban la relacion, no de estos excesos, sino de las velocidades de enfriamiento que les corresponden. Operando así, han visto que la relacion de la cerusa era de 19, resultado que, como se ve, es poco más ó ménos el mismo que se obtiene tomando el complemento del poder difuso del mismo cuerpo.

Los poderes absorbentes y emisivos de los cuerpos varian en el mismo sentido y en igual proporcion, como así se desprende á la vez de la práctica y de la teoría de los cambios de temperatura conocida con la denominacion de *equilibrio móvil de temperatura*, y que procuraremos resumir en pocas líneas.

Cuando un número cualquiera de cuerpos, que estén á la misma temperatura, se hallan contenidos en un recinto cuyas paredes tengan tambien una temperatura uniforme igual á la primera, admítese que esta temperatura comun subsiste constante y que la cantidad de calor no varía ó que hay equilibrio de aquella entre los cuerpos y el recinto. Se puede explicar este estado de equilibrio de dos maneras distintas. La primera consiste en suponer que no hay radiacion recíproca de los cuerpos y de las paredes del recinto, que no media cambio alguno de calor, y que el equilibrio es la consecuencia de esta carencia de radiacion y de absorcion. Pero tambien puede suponerse que el recinto y los cuerpos no cesan de radiar unos hácia otros, cambiando entre sí rayos ó haces de calor de igual intensidad, y emitiendo cada cuerpo precisamente tanto calor como recibe. El físico ginebrino P. Prevost discurrió y desarrolló esta segunda explicacion, generalmente admitida, la cual supone que existe igualdad entre el poder emisivo y el absorbente de un mismo cuerpo. Cuando los cuerpos en presencia y las paredes del recinto tienen temperaturas iguales, los más calientes radian más calor del que reciben y se enfrian; los otros, por el contrario, se caldean absorbiendo más calor del que emiten. Este cambio hace que se igualen progresivamente las temperaturas, y que resulte en definitiva, cuando se restablece el equilibrio, una temperatura uniforme que se mantiene segun acabamos de decir, en virtud de un cambio continuo de calor.

Tambien se puede demostrar de otro modo la necesidad de la igualdad de los poderes absorbente y emisivo de un mismo cuerpo. Cuando un haz de calor radiante da en un punto de la superficie, se refleja con regularidad una fraccion de él, otra se difunde y el resto queda absorbido. Si, al mismo tiempo, un haz tiende á salir de la superficie al mismo punto, se refleja una fraccion, otra se difunde, y en realidad la diferencia es la emitida. Si i é i' son las intensidades de dos haces r, r', d y d' los poderes reflectores y difusos del cuerpo considerado, tendremos $q=i\ (1-r-d)$ como cantidad de calor absorbido y $q'=i'\ (1-r'-d')$ como cantidad emitida. Refiriendo á la unidad los varios poderes de ambas expresiones, claro está que la relacion entre el poder absorbente y el emisivo

será la de las cantidades $1-r-d$ y $1-r'-d'$ (1). Luego fácilmente se comprende que las causas que hacen variar los poderes reflector y difuso exteriores hacen variar de igual modo los mismos poderes interiores. Hay pues proporcionalidad entre el emisivo y el absorbente de un cuerpo, é igualdad entre ellos si se los refiere á la misma unidad, por ejemplo al poder emisivo y al absorbente del negro de humo. La experiencia confirma la exactitud de este raciocinio, que supone por otra parte que los dos haces caloríficos son de la misma naturaleza. La Provostaye y Desains han averiguado, por ejemplo, que el poder reflector del vidrio, con respecto al calor emanado de láminas ó placas ennegrecidas á 150° ó 200°, tiene por valores: 10, 11, 25, 32 con incidencias de 30°, 45°, 70°, 75°; y como el vidrio no tiene poder difuso apreciable, resulta que los poderes absorbentes de este cuerpo, relativamente al calor procedente de dichos focos, son respectivamente iguales á 90, 89, 75, 68, valores que son precisamente los comprobados para los poderes emisivos del vidrio con las mismas inclinaciones. Tomemos de los citados físicos otro ejemplo. Los poderes emisivos á 100° de los metales bruñidos, como plata, oro ó platino, son 2,5 3,5 y 10,5. Los reflectores para el calor emanado de focos ennegrecidos á bajas temperaturas son iguales á 98, 96 y 90, es decir, complementarios de los poderes emisivos; por consiguiente, estos son iguales á los absorbentes de los mismos cuerpos.

Ritchie discurrió un experimento merced al cual se puede comprobar la igualdad de los dos poderes en el caso del calor oscuro. En lugar de las dos bolas del termómetro diferencial de Leslie ponia dos recipientes cilíndricos B y C, entre los cuales colocaba un cilindro A lleno de agua (fig. 115). Las caras que se miraban de los recipientes estaban cubiertas, una de una hoja de metal brillante, y otra de negro de humo. El cilindro A, que podia ir á un lado ó á otro por una corredera, se acercaba ó alejaba de B y de C. Pues bien, la experiencia demostraba que si se le ponia á igual distancia de los otros dos, las columnas líquidas del termómetro permanecian al mismo nivel y en equilibrio; por consiguiente, los dos cilindros B y C absorbian la misma cantidad de calor. Llamando e y e' á los poderes emisivos de las caras del cilindro A, y a y a' á los poderes absorbentes de las caras de B y C vueltas hácia el foco, es evidente que los calores absorbidos son proporcionales á los productos $e'a$ y ea'. Como, segun la experiencia $e'a = ea'$, si tomamos por unidades de los poderes absorbente y emisivo a' y e', que son los del negro de humo, resultará $a=e$.

Para terminar este artículo, digamos algo acerca de la influencia de los colores de los cuerpos en su poder absorbente, y sobre los recientes experimentos que á ella se refieren.

Los de Franklin hicieron ya patente la influencia del calor en la absorcion de las radiaciones caloríficas. El ilustre físico puso sobre nieve pedazos de telas de varios colores, y los dejó algun tiempo expuestos al calor solar. Al absorber dichos fragmentos los rayos de calor se calentaron, derritieron la nieve que tenian debajo, y se hundieron así á diferentes profundidades, tanto mayores cuanto más oscuro era su color. De esta circunstancia creyó poder sacar en consecuencia que los cuerpos de colores claros son los peores absorbentes, y los de colores negros ú oscuros los mejores, lo cual justificaba una vez más la supuesta identidad de los rayos de luz y de los de calor. Pero Tyndall ha demostrado recientemente que esta identidad no es rigorosa en absoluto. Segun este físico, hay que tener en cuenta la naturaleza del manantial de calor, pues los rayos de calor oscuro no actúan del mismo modo que los de calor luminoso. Tambien se ha de tomar en consideracion el poder diatermano de las sustancias. Así es que habiendo espolvoreado dos tarjetas, una con polvos blancos de alumbre, y otra con polvos negros de iodo, acercándolas luégo al fuego, vió que la tarjeta iodada apénas se calentaba, miéntras que la otra se habia puesto muy caliente; Tyndall atribuye esta diferencia á la propiedad diatérmica que el iodo posee en alto grado: el calor radiante penetra en el polvo y se refleja en las superficies límites de las moléculas, sin que estas lo absorban. Por esto tambien, un fragmento de fósforo amorfo, casi negro, puesto en el foco de la luz eléctrica, no pudo inflamarse, al paso que el

(1) Si se trata de cuerpos bruñidos sin poder difuso, d y d' son nulos; y lo serán tambien r y r' tratándose de cuerpos mates que no tengan poder reflector regular apreciable.

mismo foco ponia casi instantáneamente el platino en incandescencia. Tyndall atribuye este efecto curioso á la diatermanidad del fósforo.

La propiedad que poseen ciertas sustancias de que las atraviesen los rayos de calor sin absorberlos, ó lo que es lo mismo, sin que aumente su temperatura, nos lleva á ocuparnos del asunto de la propagacion del calor radiante al través de los cuerpos, y de la medida de lo que Melloni ha llamado poder diatermano.

VII

DETERMINACION DEL PODER DIATERMANO DE LOS CUERPOS. —REFRACCION DEL CALOR

Esta propiedad es sobremanera marcada en la sal gema. De 1000 rayos llegados á la superficie de una lámina de esta sustancia, 923 son trasmitidos, los 77 rayos que no pasan se reflejan en las dos caras de la lámina; por consiguiente, ninguno de ellos queda absorbido. Este notable resultado, descubierto por Melloni, es siempre el mismo cualquiera que sea la naturaleza de los rayos de calor, y tanto si se trata de calor luminoso como del oscuro.

El alumbre y el vidrio no son diatermanos sino para las radiaciones de calor luminoso, pero detienen los rayos del oscuro; sucediendo lo propio con el espato de Islandia, con el cristal de roca y con el hielo. El espesor de las láminas influye en la absorcion así como en la trasmision de los rayos de calor; pero esta influencia no crece en proporcion del espesor. Así, de 100 rayos que lleguen á dos láminas ó placas diatermanas, una de doble espesor que la otra, 62 pasan á la más delgada y 38 á la otra; una lámina cuyo espesor sea cuádruple que el de otra, da paso á 55 rayos.

La comparacion de los poderes diatermanos de los cuerpos se hace con el aparato de Melloni, dispuesto como se ve en la figura 116. La placa de la sustancia cuyo poder diatermano se trata de averiguar está en D, sobre un soporte; y la pila termo-eléctrica colocada en E, en la direccion del haz de calor que atraviesa la abertura practicada en la pantalla C. Empiézase por anotar la desviacion de la aguja del galvanómetro producida por el haz directo sin interposicion de la placa, y colocando luégo esta última en su soporte, se anota tambien la desviacion producida por el mismo haz al atravesar la placa. La relacion entre ambas desviaciones da el poder diatermano de la sustancia. Para estudiar la influencia de la naturaleza del foco, basta poner en lugar de la lámpara Locatelli otros generadores de calor, por ejemplo un cubo de agua hirviendo, una placa de cobre

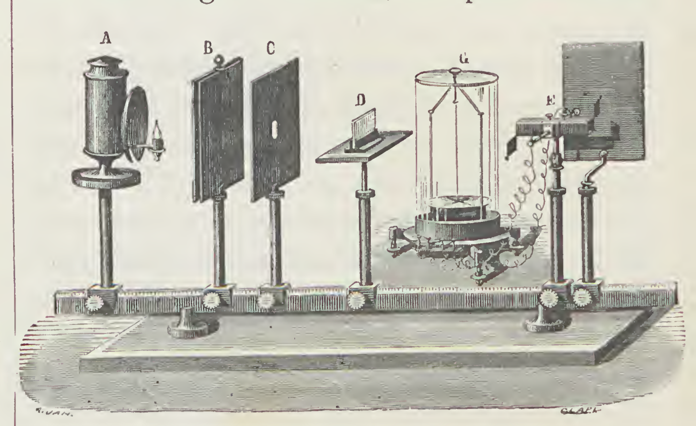


Fig. 116.—Aparato de Melloni para medir el poder diatermano de los cuerpos

ennegrecida ó una hélice de platino incandescente, como se ve en las figuras 117, 118 y 119. En los experimentos que Melloni hizo acerca de este asunto, tuvo cuidado de colocar estos diferentes generadores, para hacer los resultados comparables, á tales distancias de la pila que el haz directo produjo las mismas desviaciones en la aguja del galvanómetro.

Hé aquí algunas cantidades que prueban la influencia de la naturaleza del foco de calor en la trasmision ó en el poder diatermano de varias sustancias:

	Lámpara de Locatelli	Cubo de agua á 100°	Cobre á 400°	Platino incandescente
Radiacion directa. . . .	100	100	100	100
Sal gema incolora. . . .	92	92	92	92
Espato de Islandia. . .	39	28	6	0
Cristal de lunas. . . .	39	24	6	0
Cristal de roca incoloro. .	38	28	6	0
Cristal de roca ahumado. .	37	28	6	0
Alumbre.	9	2	0	0
Hielo muy puro. . . .	6	0	0	0
Sulfato de cal.	14	5	0	0

Se ha deducido de estos experimentos que así como hay varios rayos de luz, hay tambien varios rayos de calor que los cuerpos absorben y trasmiten en diferentes proporciones, casi del mismo modo que los cuerpos trasparentes absorben ó dejan pasar con preferencia tales ó cuales colores. Melloni ha empleado, para expresar esta propiedad, la palabra *termocroismo*, formada de otras dos que significan *calor* y

coloracion. Antes de hacer un resúmen de los principales fenómenos que constituyen esta importante parte de la teoría del calor radiante, entremos en algunos detalles acerca de una propiedad que es asimismo comun á la luz y al calor: nos referimos á la desviacion que sufren los rayos caloríficos al cambiar de medio.

Los rayos de calor que penetran en un medio

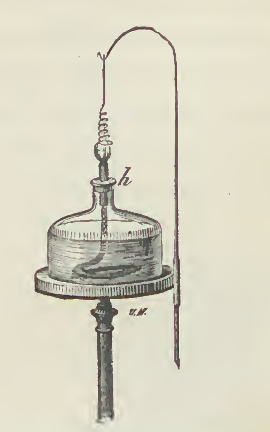



Fig. 117.—Hélice de platino incandescente

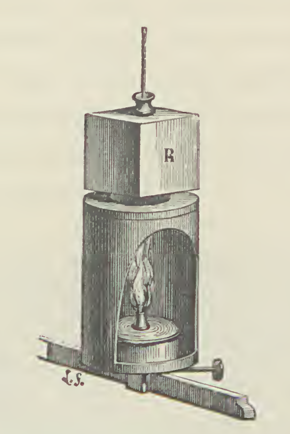


Fig. 118.—Cubo de agua hirviendo

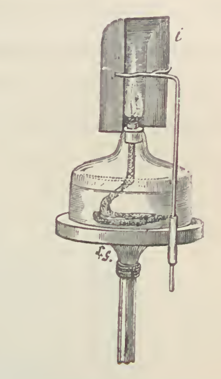
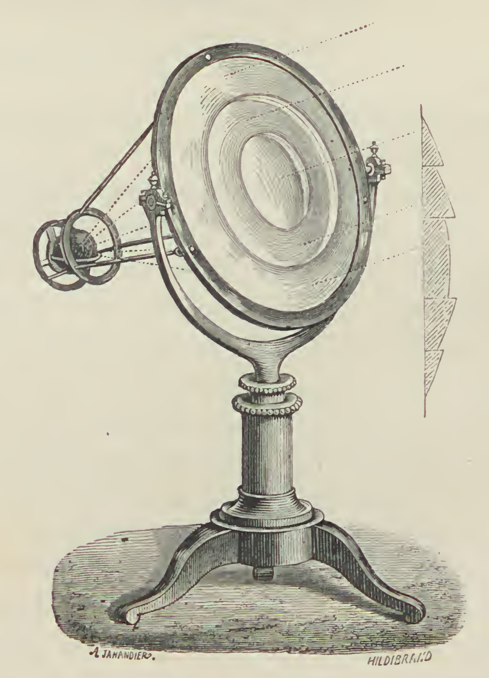


Fig. 119.—Placa de cobre ennegrecida calentada á 400°

diatermano, experimentan efectivamente en él un cambio de direccion que hemos estudiado ya al tratar de la luz con el nombre de *refraccion.* Si el haz calorífico cae perpendicularmente sobre la superficie del medio, no hay desviacion; pero con cualquier otra incidencia el haz se desvia; y se aproxima á la perpendicular al punto de incidencia cuando pasa de un medio á otro de mayor densidad. En una palabra el enunciado de las leyes de la refraccion del calor es el mismo que el de las de la refraccion de la luz. Así se demuestra prácticamente empleando al efecto lentes esféricas convergentes para concentrar los rayos caloríficos que acompañan á los luminosos del sol. Entónces se ve que en el foco, ó sea donde la luz es más intensa, es tambien más fuerte el calor, pudiendo cualquiera comprobar la exactitud de este hecho encendiendo con un cristal de aumento una sustancia que sea un tanto inflamable á los rayos del sol, como yesca, tela, madera, papel, etc. Verdad es que aquí se trata de generadores de calor luminoso; pero Melloni ha demostrado, valiéndose de prismas y lentes de sal gema,—sustancia que absorbe ménos calor que cualquier otra,—que el calor oscuro se refracta del mismo modo que el emanado de focos incandescentes.

Háse utilizado la refraccion del calor, lo propio que la reflexion, para producir un calor muy intenso mediante la concentracion de los rayos caloríficos del sol, dándose el nombre de *cristal ardiente* ó *ustorio* á toda lente construida con tal objeto con una sustancia diatermana cualquiera. La potencia de un cristal ardiente es tanto mayor cuanto más grande sea su abertura, y de mayor longitud los radios de las esferas á los cuales pertenecen las superficies de la lente. Tschirnhausen, célebre por la construccion de espejos ustorios de gran potencia,


Fig. 120.—Lente de escalones

hizo construir tambien vidrios de casi un metro de diámetro con los cuales consiguió fundir metales y vitrificar materias minerales. Buffon obtuvo los mismos resultados con una lente de escalones; ya hemos visto que esta es un vidrio

con una de sus superficies plana y la otra tallada en coronas concéntricas. La curvatura de cada una de estas coronas está calculada de suerte que los rayos solares se encuentran en un mismo punto de la superficie (fig. 120). Siendo el espesor del vidrio de un aparato de esta clase mucho menor que el de una lente ordinaria de la misma abertura, hay ménos calor absorbido, y el efecto calorífico en el foco comun es más intenso.

Se ha ideado tambien construir cristales ustorios con varios líquidos; la lente estaba formada por dos vidrios convexos que dejaban entre sí una cavidad, la cual se llenaba del líquido que se queria emplear. Cítase en esta clase el cristal ardiente construido el siglo pasado por Bernières y Trudaine: tenia 4 piés (1^{m},33) de diámetro, y 8 piés de radio de curvatura. Llenándolo de esencia de trementina y exponiéndolo á los rayos solares, se obtuvieron efectos caloríficos de extraordinaria intensidad.

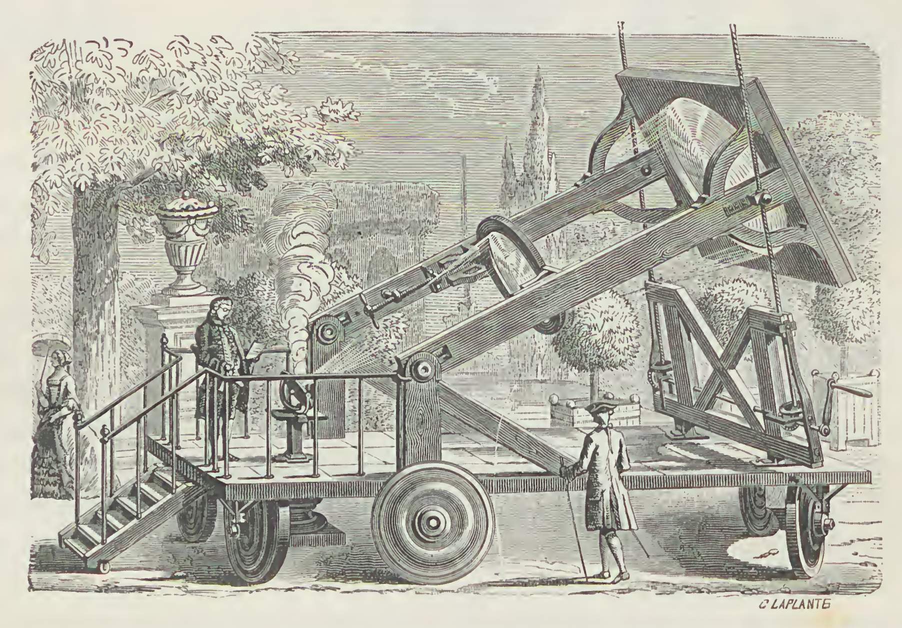


Fig. 121.—Experimento del vidrio ardiente de Bernières

Todo el mundo ha oido contar que los marinos, en sus viajes á las regiones heladas de los polos, se han valido de lentes de hielo para encencer fuego. En Inglaterra se han hecho con una lente de hielo de gran diámetro (3 metros) interesantísimos experimentos, que han demostrado la posibilidad de inflamar pólvora y papel en el foco de esta lente de nuevo género.

VIII

ANÁLISIS DE LAS RADIACIONES CALORÍFICAS.—TERMOCROSIS

Al estudiar las radiaciones solares hemos visto que, además de la propiedad que tienen de ser luminosas, es decir, de afectar la retina suscitando la doble sensacion de la luz y del color, gozan tambien de otras dos propiedades, la de emitir calor y la de ejercer una accion química. Sabemos además que, aparte de los rayos que componen el espectro luminoso, la radiacion solar comprende toda una serie de rayos ménos refrangibles, cuyo conjunto forma un espectro oscuro y calorífico de extension no menor que la del espectro luminoso. Por último, otra tercera serie de rayos más refrangibles constituye la parte exclusivamente química de esta radiacion. Los demás focos luminosos, analizados del mismo modo con el prisma, presentan análoga constitucion, aunque distinguiéndose unos de otros por la extension de sus espectros, por la intensidad relativa de las radiaciones de varias clases, y finalmente por los espacios vacíos que la observacion ha notado en ellos. Nos ocuparemos aquí únicamente de lo que atañe á las radiaciones caloríficas, y empezaremos para recordar, si bien completándolo, lo que se ha dicho en el segundo tomo del MUNDO FÍSICO acerca de este asunto.

Una de las primeras cuestiones que los físicos se han planteado en presencia del espectro solar, es la de la distribucion del calor en sus diferentes partes. Al principio se creyó naturalmente que las intensidades de los rayos de color

estaban repartidas con igualdad por lo que respecta á la luz y al calor, y los primeros experimentos, hechos por Landriani, Rochon y Sennebier, parecieron confirmarlo así; estos físicos observaron el máximum de temperatura en el amarillo, es decir, en la parte más brillante del espectro. En 1800, W. Herschel descubrió la existencia de rayos caloríficos oscuros, de menor refrangibilidad que los del extremo rojo; y halló el máximum de temperatura entre ellos, cerca del límite inferior del espectro. Estos experimentos, repetidos por Malus y Berard en presencia de Berthollet, confirmaron el descubrimiento del ilustre astrónomo, pero difirieron de los de este en lo que respecta á la posicion del máximum, pues lo encontraron en el límite rojo y no en la parte oscura del espectro. Leslie, Ritter, Davy y otros observadores emprendieron las mismas indagaciones, sin dar con resultados más concordantes que los de sus predecesores. Seebeck hizo ver entónces (1828) que todas las determinaciones del máximum de temperatura eran verdaderas, y que las divergencias procedian de la naturaleza del prisma empleado para descomponer los rayos solares. Y en efecto, habiendo estudiado dicho físico la marcha comparativa del termómetro en espectros formados por prismas diferentes, de agua, de ácido sulfúrico, de alcohol, de crown-glas y de flint-glass, observó que la posicion del máximum correspondia al amarillo con el prisma de agua, segun lo habian observado Rochon y Sennebier, al anaranjado con el de alcohol y el de ácido sulfúrico, al extremo rojo en la posicion indicada por Malus y Bérard con un prisma de crown-glass ó de ciertas especies de flint-glass, al paso que empleando el flint-glass inglés, el máximum estaba en la zona marcada por los experimentos de Herschel.

Los de Melloni (1832) completaron la demostracion de Seebeck y patentizaron la desigual accion absorbente de los varios medios sobre los diferentes rayos que componen el calor solar. El eminente físico se propuso averiguar «por qué las sustancias incoloras, que no producen variacion alguna en las intensidades relativas de los rayos luminosos, han de dar tan grandes diferencias con respecto al calor. «Hé aquí precisamente, dice, la cuestion que traté de resolver hace unos doce años en virtud de una serie de experimentos cuyos primeros resultados comuniqué á la Academia de Ciencias por mediacion de Arago. Habiendo tomado las temperaturas de las principales bandas coloradas de un espectro dado por un prisma de crown-glass, y comprobado que el *máximum* de temperatura estaba en la extremidad del rojo, proseguí explorando con un termo-multiplicador rectilíneo la distribucion del calor más allá de dicha extremidad y anoté las seis bandas inferiores de calor oscuro isotermas con los seis colores superiores del espectro; en seguida interpuse una capa de agua de cuatro milímetros de espesor contenida entre dos placas paralelas de vidrio, de modo que los rayos emergentes del prisma se trasmitiesen al través de dicha capa en una direccion que no se desviaba mucho de la perpendicular, y medí de nuevo las temperaturas de las bandas oscuras y luminosas, observando tal alteracion en ellas que algunas habian quedado totalmente destruidas, y otras debilitádose más ó ménos, no faltando otras cuya disminucion apénas era perceptible. La zona que habia sufrido la destruccion total era la ménos refrangible, es decir, la banda isoterma del morado; desde allí la pérdida era más y más marcada á medida que se acercaba á la banda roja; disminuia tambien en el rojo, en el anaranjado y en una parte del amarillo, y despues las proporciones de las temperaturas iniciales se mantenian casi constantes hasta el límite morado superior.

«Esta accion desigual ejercida por el agua sobre las diferentes bandas del espectro debia necesariamente desviar el máximum de temperatura y hacerle marchar hácia los rayos más refractados, puesto que las bandas ménos refrangibles, á las que llamamos para abreviar *bandas inferiores*, experimentaban una pérdida mucho mayor que las más refrangibles ó superiores; y así sucedió, porque el máximum de calor pasó del último límite del rojo á la parte superior del anaranjado. Este experimento probaba incontestablemente que *el calor distribuido en las diferentes partes del espectro solar no es un agente homogéneo.*»

Melloni demostró que esta heterogeneidad no era peculiar de la radiacion calorífica solar, sino que existia tambien en los flujos de calor procedente de manantiales terrestres luminosos ú



oscuros, en una palabra, que estos manantiales estaban compuestos de varios elementos caloríficos y enteramente análogos á los rayos colorados de que se compone la luz. Estos elementos, trasmitidos en igual abundancia por capas muy tenues de cuerpos diáfanos, como agua, vidrio, alcohol, etc., atravesaban en proporciones muy distintas las capas gruesas de estos mismos cuerpos; además, las cantidades iguales de calor, recogidas al salir de las capas de diferente naturaleza, pasaban en cantidad tan diferente por una lámina determinada de una sustancia diáfana incolora, que ciertos rayos eran enteramente trasmitidos y otros totalmente absorbidos. Hemos visto, por otra parte, que Melloni habia puesto en completa evidencia el notable hecho de una sustancia diáfana incolora, como la sal gema, que trasmite con igual facilidad toda clase de rayos caloríficos, así los oscuros como los luminosos. Melloni ha formulado así la consecuencia:

«Combinando, dice, estos datos con la nocion de la trasmision constante de la sal gema para toda clase de radiaciones, directas ó modificadas, durante su paso á través de los medios diatérmicos, creo poder aventurarme á deducir que el vidrio, el agua, el cristal de roca, y en general todos los cuerpos diáfanos é incoloros, son termocróicos, es decir, actúan sobre los rayos caloríficos como los medios coloreados sobre la luz. Entónces se presentó bajo su verdadero punto de vista la cuestion de la distribucion de las temperaturas en el espectro solar. Pareceria ciertamente absurdo el procedimiento del que quisiera comparar las intensidades relativas de las elementos luminosos separados por las diferencias de refraccion de un prisma de vidrio fuertemente coloreado de azul con óxido de cobalto, ó dotado de cualquier otra coloracion intensa. Precisamente era esta la tarea que se habia desempeñado hasta entónces estudiando la distribucion del calor en los espectros dados por los prismas ordinarios de crown y de flint-glass, de agua, de alcohol y de otras sustancias incoloras. Para conocer las verdaderas temperaturas de las zonas prismáticas, luminosas ú oscuras, era evidentemente necesario descomponer el rayo solar con el prisma de sal gema, que, siendo igualmente permeable á toda especie de radiacion calorífica, constituia, para no salir de nuestra comparacion, el vidrio blanco del calor.»

Hay pues una coloracion calorífica así como hay una coloracion luminosa; de aquí el nombre de *termocrosis* dado por Melloni á esta clase de fenómenos, y el de termocróico aplicado á un cuerpo que, diáfano ó incoloro para las radiaciones luminosas, absorbe, áun siendo de tenue espesor, una proporcion notable de un haz de calor solar natural, y trasmite el resto del haz en un estado de composicion muy distinto del que le caracterizaba ántes de la incidencia. Solamente una sustancia diáfana incolora desempeña el papel de *vidrio blanco para el calor*, ó es *leucotérmica*: la sal gema (1).

Resulta de aquí que si se representa con una curva la intensidad del calor de las varias partes del espectro solar, en toda su extension química, luminosa y calorífica, esta curva variará segun la naturaleza de la sustancia de que se compone el prisma que ha servido para obtener el espectro, ó lo que es lo mismo, se tendrán tantas curvas de intensidad como sustancias diatermanas; aunque cada una de ellas no representará más que la intensidad de las radiaciones no absorbidas. Tan sólo la curva relativa á la sal gema dará la representacion verdadera, ó á lo ménos proporcional, de la radiacion calorífica total.

La figura 122 representa esta última curva con arreglo á los experimentos de Franz y de Muller, y tambien la que se obtiene con un prisma de crown. Estas dos curvas, que se confunden en toda la extension del espectro luminoso, van elevándose contínuamente, desde un punto de la parte ultra-morada hasta el extremo rojo. Más allá, la intensidad luminosa sigue siendo la misma para los dos espectros, poco más ó ménos hasta el máximum relativo al crown. El verdadero máximum *mn* del espectro calorífico de la sal gema está á una distancia del límite rojo extremo igual á la que separa este límite del azul-verde. Más léjos el calor va decreciendo hasta X donde es nulo, de

(1) Melloni admitia que la proporcion de 0 923 que la sal gema bien pura trasmite, cualquiera que sea la longitud de onda de los rayos, es siempre la misma aunque el espesor varíe, y que los 0,077 de pérdida se deberian probablemente á las reflexiones del calor en las dos caras; pero las investigaciones de la Provostaye y Desains han demostrado que en realidad hay una parte de dichos rayos absorbida y que esta absorcion es mayor para el calor oscuro.

suerte que la longitud de la parte oscura es á corta diferencia tan grande como la de todo el espectro luminoso.

Esta proporcion entre las partes visible y oscura de la radiacion solar no seria probablemente la misma si pudiera efectuarse el análisis de la luz del sol más allá de los límites de la atmósfera. Y en efecto, resulta de las investigaciones hechas sobre la absorcion de los rayos caloríficos por los gases y los vapores, que los poderes absorbentes de los gases trasparentes, nulos para las radiaciones luminosas, son rela-

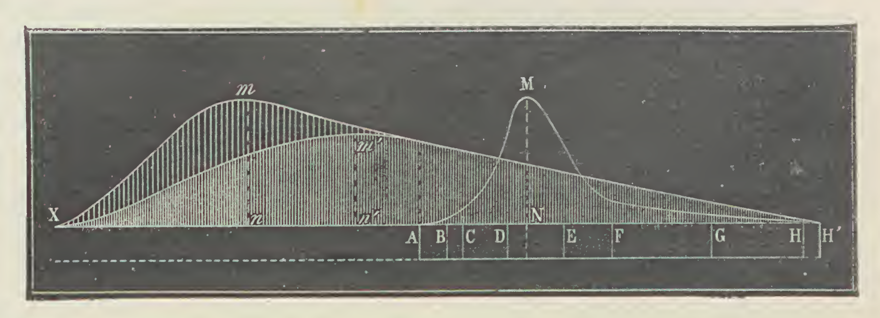


Fig. 122.—Curvas de las intensidades caloríficas de la radiacion solar. X *m* H', curva obtenida con un prisma de sal gema; X *m'* H', curva obtenida con un prisma de crown; A M H, curva de las intensidades luminosas

tivamente considerables para las oscuras. Tyndall ha verificado muchos experimentos acerca de este asunto, valiéndose con tal objeto de un tubo horizontal cuyas aberturas estaban tapadas con placas de sal gema; hecho el vacío en el tubo, introducia en él sucesivamente los gases cuyos poderes absorbentes queria comparar. A igual distancia de las dos caras de una pila termo-eléctrica, dos focos caloríficos de la misma potencia (cobre calentado á 400°, es decir á ménos del rojo) radiaban sin producir desviacion en la aguja del galvanómetro, miéntras las intensidades de los haces caloríficos eran iguales; mas tan luégo como se interponia en el camino de uno de los haces el tubo lleno de gas, rompíase el equilibrio y la desviacion de la aguja indicaba qué calor habia absorbido la columna gaseosa. Tomando por unidad el calor absorbido por el aire atmosférico á la presion ambiente, hé aquí algunas cifras obtenidas por Tyndall para la absorcion relativa de algunos gases á la presion de 25 milímetros de mercurio:

Aire..	1	Acido carbónico.. .	972
Oxígeno.	1	Protóxido de ázoe. .	1590
Nitrógeno.	1	Hidrógeno sulfurado.	2100
Hidrógeno.. . . .	1	Amoniaco.. . . .	5460
Oxido de carbono. .	750	Acido sulfuroso. . .	6480

Como se ve, los gases simples son de escaso poder absorbente, que es igual para todos ellos; en cambio los compuestos lo tienen en alto grado, pareciendo crecer á medida que se acercan á su punto de liquefaccion. Lo propio sucede con los vapores. Los perfumes difundidos por el aire absorben tambien las radiaciones oscuras (1). Segun Tyndall, el poder absorbente del vapor de agua es bastante mayor que el del aire que lo contiene; y el aire saturado de humedad tiene, á una atmósfera de presion, una accion absorbente cien veces tan grande como la del aire seco. M. Magnus de Berlin ha puesto en duda la exactitud de las conclusiones del físico inglés, pues en su concepto, el aire húmedo no tiene mayor poder absorbente que el seco; y no es el agua en estado de vapor, sino más bien en el vesicular que presenta en las nubes y en las nieblas, la que debia causar la absorcion medida por Tyndall. Pero sea cual

(1) Tyndall describe del modo siguiente los experimentos que le han servido para averiguar la influencia absorbente de varios olores: «Hé aquí, dice, unos cuantos cuadraditos de papel secante; los enrollo formando con ellos pequeños cilindros de 5 centímetros de longitud y los humedezco sumergiéndolos por uno de sus extremos en un aceite aromático: este líquido penetra en el papel en virtud de la atraccion capilar y el cilindro entero resulta impregnado de él. Introduzco el papel así impregnado y humedecido en un tubo de vidrio de diámetro tal que lo ocupe el cilindro sin estar comprimido; y luégo coloco entre mi aparato secador y el tubo de experimento, el que contiene el papel aromatizado. Hago el vacío en el tubo de experimento y la aguja se pone á cero; abriendo ahora esta llave, hago que pase poco á poco aire seco al través de los pliegues del papel saturado: el aire seco se impregna del perfume del aceite aromático y lo arrastra consigo al tubo de experimento. Sabemos que la absorcion de una atmósfera de aire seco tomada por unidad produce una desviacion de un grado; luego cualquier absorcion adicional ó mayor que la unidad revelada por el experimento dinamará del olor que acompaña al aire.» Hé aquí algunos de los resultados:

Patchulí..	30	Tomillo.. . : . . .	68
Esencia de clavillo. . .	34	Manzanilla.	87
Esencia de rosa. . . .	37	Casia..	109
Espliego..	60	Gran Lavanda. . . .	355
Limon.	65	Anis..	372

fuere la causa de esta absorcion, no por eso deja de existir, y por consiguiente debe desempeñar un gran papel en la atmósfera. Nos ocuparemos más adelante de las consecuencias que deben deducirse de este hecho para la explicacion de varios fenómenos de meteorología.

La distribucion del calor en los espectros varía, como era de esperar, con la naturaleza del foco, es decir, con la proporcion de los rayos de diferentes refrangibilidades que contiene. Tyndall ha dado un ejemplo de esta diferencia trazando la curva de la distribucion relativa al espectro de arco voltaico obtenido con un prisma de sal gema; el arco estaba formado por una pila de cincuenta elementos Grove, haciéndole constante con un regulador Foucault construido por M. Duboscq. La figura 123 representa esta curva, que es el promedio de un gran número de determinaciones efectuadas con el auxilio de la pila termo-eléctrica. Así como en las curvas de la figura 122, las ordenadas que marcan las intensidades relativas de la radiacion calorífica son proporcionales á las desviaciones observadas. Hé aquí las observaciones de Tyndall acerca de este asunto:

«El espacio XMOA, dice, representa la radiacion invisible. Vése aquí que la intensidad del poder térmico aumenta gradualmente del extremo azul al extremo rojo del espectro, y que en la region de los rayos oscuros más allá del rojo, la curva se eleva súbitamente, formando un pico escarpado y macizo que por su magnitud hace que parezca muy mezquina la parte de la figura que representa la radiacion visible. Los rayos del sol, ántes de llegar á la tierra, han de atravesar la atmósfera, donde encuentran el vapor oscuro atmosférico, que ejerce una poderosa absorcion en los rayos de calor invisibles. De aquí debe resultar, prescindiendo de cualquier otra consideracion, que la proporcion entre la radiacion invisible y la visible, con respecto al sol, debe de ser mucho menor que con respecto á la luz eléctrica. Vemos que la experiencia confirma esta conclusion; porque, miéntras la figura 122 nos muestra la radiacion invisible del sol casi doble que la visible, la 123, la invisible de la luz eléctrica cerca de ocho veces tan grande como la visible. Si se hace pasar el haz de luz eléctrica al través de una capa de agua de espesor conveniente, se pone su radiacion casi en iguales condiciones que la del sol, y descomponiendo el haz tamizado de este modo, se obtiene una distribucion de calor muy parecida á la que se observa en el espectro solar.»

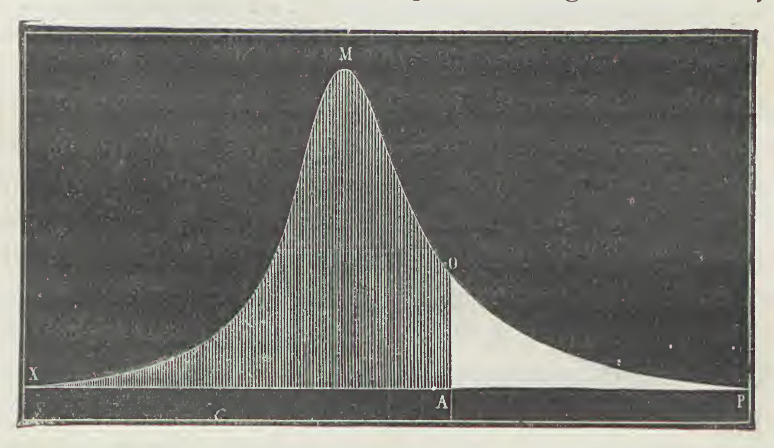


Fig. 123.—Curva de la intensidad calorífica de las radiaciones oscuras y de las luminosas del arco voltaico, segun Tyndall

«He hecho, añade el físico inglés, muchos experimentos, para reconocer si habia alguna solucion de continuidad en el espectro calorífico: pero todas las medidas tomadas hasta ahora en focos artificiales, revelan un aumento gradual y continuo de calor, desde el punto en que empieza á ser perceptible hasta el máximum. Sir John Herschel ha demostrado que no ocurria esto en la radiacion del Sol, cuando se analiza con un prisma de flint-glass. Haciendo que el espectro solar se forme en una hoja de papel ennegrecido, sobre la cual se habia esparcido alcohol, aquel eminente físico determinó el poder calefaciente del espectro por su poder vaporizonte ó secante; y vió que la superficie mojada formaba al secarse una serie de manchas que representaban maxima térmicas, separadas entre sí por espacios de una intensidad calorífica relativamente débil. No se han observado má-

xima y mínima semejantes en el espectro de la luz eléctrica, ni en el de un alambre de platino calentado al blanco por una corriente voltaica.»

Los vacíos encontrados por Herschel en el espectro solar dimanan probablemente de la absorcion electiva que ejercen las capas de nuestra atmósfera, y quizás tambien la de la solar en las radiaciones caloríficas de la fotoesfera. El astrónomo americano S. Langley se ha ocupado recientemente de la misma cuestion, de la cual volveremos á tratar más adelante cuando nos ocupemos de la energía de la radiacion solar.

CAPÍTULO XIII

PROPAGACION DEL CALOR.—CONDUCTIBILIDAD

I

CONDUCTIBILIDAD DE LOS CUERPOS SÓLIDOS HOMOGÉNEOS

Hemos visto que si se tiene en la mano una barra de hierro cuyo extremo se haya metido en un foco incandescente, el calor del foco se comunica al metal, se propaga de molécula en molécula á lo largo de la barra, y al poco rato la temperatura se eleva hasta el punto de quemar la mano y de obligarla á soltar el hierro. Si en lugar de ser la barra de este metal fuese de cualquier otro, pero de diámetro y longitud iguales, se observaria análogo efecto, si bien veríamos variar á la vez el tiempo que invierte en ponerse á cierta temperatura un punto situado á una misma distancia de la extremidad caldeada en cada barra, y la distancia del punto más alejado de cada una de ellas susceptible de adquirir una temperatura determinada. Hé aquí un experimento muy sencillo que hará patente la diferencia de que hablamos:

Tomemos dos barras de iguales dimensiones, una de cobre y otra de hierro, y peguemos á ellas con cera y á distancias iguales de los extremos unas bolitas de madera. Pongamos en seguida las barras punta con punta y calentemos los extremos contiguos, por medio de una lámpara de espíritu de vino puesta debajo del punto de union. Al poco rato veremos que caen las bolas unas tras otras, á medida que derrite la cera el calor que se propaga en cada barra por vía de conductibilidad; mas al cabo de un período de tiempo determinado veremos que el número de bolas caidas en la barra de cobre es mayor que el de la de hierro. Por otra parte, dos bolas de la misma fila, situadas por consiguiente á igual distancia del foco, no caen simultáneamente. Prescindiendo por un momento de la rapidez con que se ha propagado el calor á lo largo de la barra, para ocuparnos únicamente del primer efecto, es decir, de la distancia á que puede llegar en ambos metales cierto grado de temperatura, que en el caso presente es el de la fusion de la cera. Como esta distancia resulta menor en el cobre, dícese de él que es *mejor conductor* del calor que el hierro.

La figura 125 representa un aparato inventado por Ingenhouz y modificado por Gay-Lussac, cuyo aparato sirve para comparar entre sí los poderes conductores de los cuerpos sólidos. Consiste en unas varillas cilíndricas de cada una de las sustancias que se han de comparar y que están dadas de una capa de cera del mismo espesor, colocadas horizontalmente de modo que por uno de sus extremos penetran en un baño de aceite ó de agua hirviendo miéntras el extremo opuesto sale fuera de la caja que contiene uno de ambos líquidos. El calor de este corre por la varilla, y derrite la cera á distancias tanto mayores cuanto más considerable es la conductibilidad de la sustancia de que aquella está formada.

Fourier ha procurado determinar en su *Teoría del calor*, por el análisis matemática, la ley de propagacion del calor por conductibilidad en los sólidos homogéneos. Partiendo del hecho práctico de que el calor emitido por un cuerpo no tan sólo procede de las moléculas superficia-

les, sino tambien de las situadas debajo de la superficie á cierta profundidad, admite que las partículas interiores son otros tantos centros radiantes que envian calor en todas direcciones. Dos partículas cualesquiera, suficientemente próximas, cambian así rayos de calor, y en virtud de este cambio la más fria gana cierta cantidad de calor que, en igualdad de circunstancias, debe ser proporcional al exceso de las dos temperaturas. Esto es lo que lleva el nombre de hipótesis de la *radiacion particular*. ¿Puede explicar esta hipótesis el modo cómo se propaga

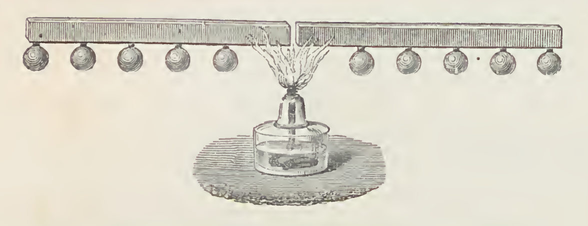


Fig. 124.—Desigual conductibilidad del cobre y del hierro

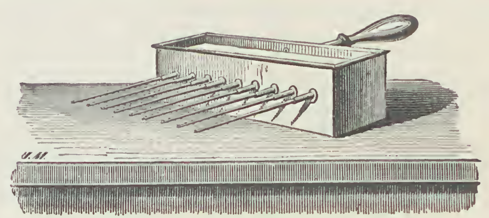


Fig. 125.—Aparato de Ingenhouz para medir poderes conductores

el calor por el interior de los cuerpos atermanos, ó por vía de conductibilidad? Dicho geómetra ha tratado de demostrarlo así sometiendo la cuestion al cálculo. Hízolo primeramente con respecto á una pared sólida, comprendida entre dos planos paralelos indefinidos, cuyas dos caras están mantenidas á temperaturas desiguales mediante dos focos constantes; cuando se establezca el equilibrio entre las temperaturas de las diferentes capas, cuando todas ellas estén atravesadas por la misma cantidad de calor al mismo tiempo, se llamará *coeficiente de conductibilidad* del cuerpo á este calor llevado á la unidad de tiempo, á la unidad de superficie y á la unidad de espesor. Partiendo Fourier de la ley que rige este caso general, ha formulado la de la propagacion en una barra rectangular indefinida, y luégo en una de longitud determinada, única en que se pueden hacer comprobaciones experimentales. Vamos á indicar, mencionando los experimentos de Despretz, cuál es esta ley.

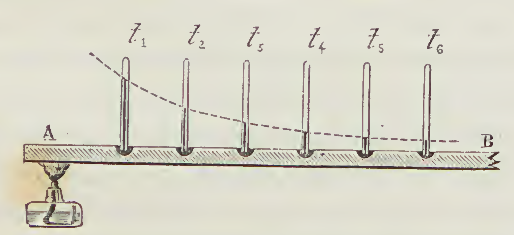


Fig. 126.—Medida de la conductibilidad de una barra
Experimento de Despretz

Véase cómo procedia este físico. Las barras de diferentes metales de que se valia tenian una seccion cuadrada de 21 milímetros de lado: á distancias iguales de 10 centímetros tenian cavidades de 6 milímetros de diámetro y de 14 de profundidad, que se llenaban de mercurio y en las cuales estaban metidos los depósitos de otros tantos termómetros muy sensibles. Un quinqué calentaba uno de los extremos de la barra en que se hacia el experimento, y un termómetro muy sensible marcaba la temperatura del aire ambiente. A las pocas horas, las temperaturas marcadas por los termómetros quedaban estacionadas y se anotaba la de cada uno de ellos. Esto sentado, véase cómo Despretz comprobaba la ley. Tomemos los resultados dados por una barra de cobre. Siendo 17°,08 la temperatura del aire exterior, los números siguientes son los de las temperaturas de los termómetros estacionarios:

	Temperaturas	Exceso sobre el aire	
1er termómetro.. .	85°,44	66°,36	2,14
2.° — .. .	63°,36	46°,28	2,15
3.° — .. .	49°,90	32°,62	2,11
4.° — .. .	41°,40	24°,32	2,17
5.° — .. .	35°,71	18°,63	
6.° — .. .	33°,26	16°,18	

«Siendo de 10 centímetros la distancia entre dos termómetros consecutivos, sus distancias al foco de calor están en progresion aritmética; los excesos de sus temperaturas sobre las del aire forman una serie geométrica, porque *el cociente de dos términos consecutivos es constante*, como se ve en la tercera columna del cuadro $\frac{66,36}{46,28}=1,4$; $\frac{46,28}{32,62}=1,4$; $\frac{32,62}{24,32}=1,4$, y así sucesivavente. *El cociente de la suma de dos excesos por el exceso intermedio es tambien constante*, como lo demuestra la cuarta columna: 2,14 es el cociente de 66,36+32,62 por el exceso intermedio 46,28; 2,15 lo es de 46,28+24,32 por 32,62, y así sucesivamente.

Operando con barras de varios metales, dadas de un barniz para igualar las pérdidas por radiacion, Despretz dedujo las relaciones de los coeficientes de dilatacion. Hé aquí sus resultados:

Oro.	1000	Estaño. . . .	303,9
Platino. . . .	981	Plomo.. . . .	179,6
Plata.	973	Mármol. . . .	23,6
Cobre.. . . .	898,2	Porcelana. . .	12,2
Hierro. . . .	374,3	Tierra de hornos.	11,4
Zinc.	363,0		

Posteriormente, Wiedemann y Franz han hecho estudios sobre el mismo asunto. Sus barras, de 6 milímetros de diámetro y 50 centímetros de longitud, estaban plateadas y bruñidas. Se tomaba la temperatura de sus diferentes puntos con la pila termo-eléctrica para evitar la alteracion producida por las cavidades en la conductibilidad de las barras, cuya homogeneidad la rompia el mercurio. Las cifras deducidas por dichos sabios son las siguientes:

Plata.	1000	Hierro.	119
Cobre..	776	Acero..	116
Oro.	532	Plomo..	85
Laton..	236	Platino.	84
Zinc.	190	Paladio.	63
Estaño.	145	Bismuto.	18

Es de notar que los números que sirven de medida para las cantidades caloríficas de los metales son casi los mismos que los que sirven para expresar sus conductibilidades eléctricas.

De todos los cuerpos sólidos, los metales son los mejores conductores del calor, exceptuando el bismuto. La piedra, el vidrio, el mármol, la porcelana, los óxidos, las tierras, lo son mucho ménos que los metales, y por último, la madera y el carbon vegetal preparado á baja temperatura, es decir, no calcinado, y en general las sustancias orgánicas, los frutos carnosos, las plantas grasas, y los tejidos de los vegetales y de los animales son malos conductores. «La madera, dice Despretz, es un conductor tan imperfecto, que en un experimento en que quise comparar su propiedad conductora con la del hierro, quemé una vara de roble por uno de sus extremos, sin poder calentarla á pocas pulgadas de distancia.» Por las cifras anteriores, se ve además la diferencia que existe entre las conductibilidades de varios metales. «Se puede hacer ostensible esta diferencia, dice Tyndall, de un modo muy sencillo, introduciendo los extremos de dos cucharas, una de plata alemana y otra de plata legítima, en un mismo vaso de agua caliente. Al poco rato se verá que el extremo libre de la segunda se ha calentado mucho más que el de la primera; y si se ponen dos pedazos de fósforo en los mangos de las

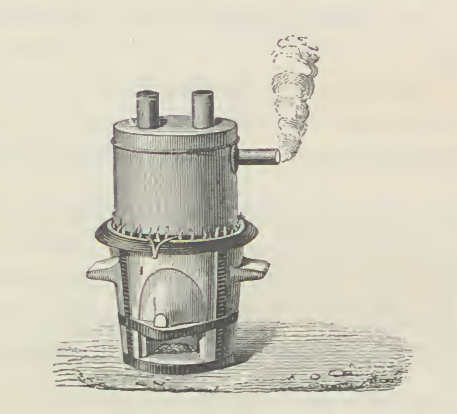


Fig. 127.—Experimento sobre la conductibilidad del hierro comparada con el bismuto

dos cucharas, se fundirá é inflamará más pronto el de la cuchara de plata buena, al paso que el calor trasmitido al través de la otra jamás llegará á tener la suficiente intensidad para inflamar el fósforo.» La razon de estos hechos está en la desigualdad del poder conductor de una y otra plata, pues siendo 100 el de la una, sólo es de 60 el de la otra.

Otra circunstancia nos probará que la conductibilidad de una sustancia no depende de la mayor ó menor rapidez con que el calor se propaga por su interior. Se toman dos cortos cilindros del mismo volúmen, uno de hierro y otro de bismuto; y despues de dar una capa de cera blanca á las bases de ambos cilindros, se los coloca sobre la tapadera de una vasija llena de agua caliente, con las bases cubiertas de cera puestas hácia arriba. El calor de la vasija se propaga por cada cilindro, y la cera llega á derretirse en ambos; pero la fusion empieza por el bismuto. Mas, segun el cuadro precedente, la conductibilidad de este metal es seis veces menor que la del hierro: ¿cuál es pues la razon del fenómeno observado? Consiste en que para elevar el mismo peso de los dos metales á igual temperatura, se necesita próximamente cuádruple calor para el hierro que para el bismuto. El calor que el primero recibe se invierte en gran parte en elevar su temperatura, lo cual explica la lentitud relativa con que se propaga por su

masa. Para comparar los poderes conductores del hierro y del bismuto, es menester tomar dos barras del mismo diámetro, medir las distancias al foco de calor de las secciones que tienen igual temperatura en el momento del equilibrio y sacar los cuadrados de los números que representan estas distancias, los cuales servirán de medida para los dos poderes conductores.

II

CONDUCTIBILIDAD DE LOS CUERPOS CRISTALIZADOS

En todo cuanto acabamos de decir, se trata de cuerpos homogéneos. En los sólidos cuya estructura no es idéntica en todos sentidos, —por ejemplo, los cristales birefringentes, el espato, el cuarzo, etc.,—la conductibilidad varía segun el sentido de propagacion del calor; existe una analogía completa entre el modo cómo se propaga el calor en estos cuerpos y el relativo al movimiento de la luz. Así por ejemplo, si se toman dos placas de cuarzo talladas, una paralela y otra perpendicularmente al eje óptico y se las cubre de una tenue capa de cera vírgen; y despues de taladrarlas, se pasa por el agujero un alambre caldeándolo con una corriente eléctrica, la cera se derrite alrededor del punto en que se ha aplicado el calor: mas al paso que la capa que limita la cera derretida es una elipse en la primera placa, es en la segunda un círculo perfecto (fig. 128), lo cual demuestra la desigual conductibilidad del cuarzo en ambos sentidos.

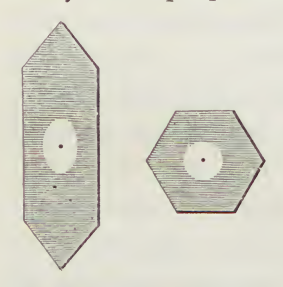


Fig. 128.—Desigual conductibilidad del cuarzo en direcciones diferentes

Senarmont hizo los primeros estudios profundos acerca de la conductibilidad del calor en los cristales y el procedimiento de observacion que acabamos de describir, excepto el modo de suspension y caldeo de la placa. Dicho físico colocaba la placa cristalina en la punta de un tubo de plata aguzado en forma de cono, y hacia pasar por el tubo una corriente de aire caliente que caldeaba así el cristal por su centro. «La fusion de la cera, dice, representaba gráficamente la marcha del calor, y á cada momento trazaba en la placa la forma de una curva isoterma.» Despues de cerciorarse de que estas curvas eran circulares en las láminas homogéneas de vidrio ó de metal; Senarmont operó con placas de cuarzo ó de espato calizo talladas perpendicularmente al eje de simetría, lo cual le dió tambien curvas circulares, segun hemos dicho más arriba, y luégo placas paralelas á dicho eje, en cuyo caso las curvas presentaban una elipticidad pronunciada, estando el diámetro mayor de la elipse dirigido siempre en el sentido del eje de simetría.

Aplicando este método á cristales de varios sistemas, Senarmont ha formulado varias leyes que prueban que hay identidad completa entre el modo de propagacion del calor y el de la luz en los cuerpos cristalizados (1).

Desde la época (1877) en que Senarmont publicó el resultado de sus trabajos, Jannetaz ha hecho extensiva la misma clase de estudios á mayor número de cristales, perfeccionando el procedimiento ántes descrito; y empleando otro método en el cual no hay necesidad de taladrar la placa cristalina. Aparte de ver confirmadas las leyes descubiertas por su eminente predecesor, y de obtener muchas medidas de los ejes de las elipses isotermas, Jannetaz ha logrado establecer una relacion interesante entre las líneas de conductibilidad máxima y mínima y los clivajes de los cristales. Por ejemplo, en los de un eje, el de mayor conductibilidad es paralelo al clivaje más fácil.

Los vegetales presentan, como los cristales, diferencias de conductibilidad calorífica, segun el sentido en que se verifica la propagacion, siendo verosímil que la causa de estas diferencias tenga cierta analogía con la que acabamos de tratar, es decir, que proceda de la falta de homogeneidad de estas sustancias. Las primeras

(1) Hé aquí, segun el autor, un resúmen de estas leyes: 1.° En los cristales de sistema regular la conductibilidad es igual en todos los sentidos, y las superficies isotermas son esferas concéntricas al foco de calor, como en los medios homogéneos; 2.° en los cristales de sistema prismático recto de base cuadrada, la conductibilidad adquiere un valor máximum ó mínimum paralelamente al eje de figura; las superficies isotermas son elipsoides de revolucion alongadas ó aplanadas; 3.° en los sistemas de cristales que se refieren al prisma rectangular recto, la conductibilidad adquiere tres valores principales que siguen direcciones paralelas á las aristas del prisma; las superficies isotermas son elipsoides de tres ejes desiguales concéntricos al foco de calor; 4.° en los cristales que se refieren al prisma rectangular de base oblícua, las superficies isotermas son elipsoides de tres ejes desiguales, teniendo uno solo de ellos una posicion determinable *á priori*, la de la arista del prisma perpendicular á los otros dos. Para más detalles, véase la Memoria de Senarmont en los *Anales de física y química* (3.ª serie, tomos XXI y XXII) ó las *Actas de la Academia de ciencias de 1847*.

investigaciones acerca de este asunto las hicieron dos sabios ginebrinos, de Candolle y de la Rive, los cuales estudiaron la conductibilidad de varias maderas resinosas, ya en el sentido de las fibras vegetales, ó ya en direccion perpendicular. Por lo general, el poder conductor es más débil en esta última direccion que en la primera, y en el roble la relacion es de 3 á 5. La diferencia parece más marcada en las maderas blandas que en las duras. Tyndall ha estudiado la misma cuestion comparando la conductibilidad en tres direcciones diferentes, paralelamente á las fibras, en un sentido perpendicular á estas y á las capas leñosas á la vez, y por último en direccion perpendicular á las fibras, pero paralela ó más bien tangente á las capas. Los resultados obtenidos por este sabio confirman los de de Candolle y de la Rive: la conductibilidad de la madera es mayor en direccion de las fibras, como tambien lo es más en sentido perpendicular á las capas leñosas que en el paralelo. Hay que añadir que el método adoptado por Tyndall no da la conductibilidad misma, sino tan sólo la velocidad de propagacion del calor, y ya hemos visto anteriormente que convenia no confundir ambas propiedades. El físico inglés ha visto además que esta velocidad de trasmision es todavía menor en la corteza que en la madera misma, y considerando sin duda que los resultados obtenidos por él podian aplicarse á los poderes conductores, dedujo de ellos que la corteza de los árboles es una especie de vaina ó forro protector que permite al vegetal arrostrar la sustraccion repentina del calor interior así como la irrupcion súbita del exterior. De la Rive y de Candolle habian hecho ya observar que el escaso poder conductor de la madera en direccion lateral es favorable para la conservacion del calor que el árbol recibe del suelo, y nosotros añadiremos que esta influencia propicia debe aumentar aún á causa de la circulacion de la savia, puesto que segun veremos, los líquidos conducen muy imperfectamente el calor.

La desigual conductibilidad de los diferentes sólidos se aprovecha en una porcion de aplicaciones. Las herramientas y utensilios de metal, cuyo uso requiere que se los someta á una temperatura elevada, están provistos de mangos malos conductores, por ejemplo de madera, que detienen casi completamente la propagacion del calor. Los tejidos de algodon, los de seda y sobre todo los de lana, son muy malos conductores, y por tanto muy á propósito para preservar el cuerpo de los excesos de calor y de frio. En verano, impiden que el calor exterior penetre hasta la superficie de nuestro cuerpo, y en invierno, por el contrario, no dejan salir el que éste conserva, por la dificultad que oponen los vestidos á su propagacion al exterior. Por lo demás, no es la sustancia de que están compuestos la única que da á los tejidos esta propiedad preciosa, sino tambien su estructura; entre los filamentos hay interpuestas capas de aire que permanecen inmóviles y conducen mal el calor, lo propio que los gases en reposo, resultando que aquel pasa con gran dificultad al través del tejido. Un almohadon de pluma conserva mucho mejor el calor que la más compacta y gruesa manta de lana.

Podríamos multiplicar estos ejemplos hasta lo infinito. Limitémonos á dos ó tres experimentos curiosos, fundados en la diferencia de conductibilidad de los cuerpos sólidos. Se envuelve una esfera metálica en una tela fina, que se mantiene muy ceñida al metal; de modo que el contacto sea perfecto. Cogiendo en seguida una brasa con unas tenazas, se la pone sobre la bola envuelta segun queda dicho. El tejido queda intacto, y por más que se sople el ascua para aumentar su incandescencia, la tela no arde; lo cual consiste en que el metal, que es muy buen conductor, absorbe inmediatamente, diseminándolo por toda su masa, el calor recibido por la tela.

Si ántes de encender un mechero de gas se pone sobre el orificio una tela metálica de tejido algo compacto, y en seguida se da vuelta á la llave, el gas se esparcirá por encima y por debajo de la tela. Si se le enciende por debajo, la combustion queda limitada á la parte inferior del chorro de gas; si por encima, arderá solamente la parte superior del chorro (fig. 129). En ambos casos la interposicion de la tela metálica bastará para limitar la combustion. La razon de esto es muy sencilla. Las mallas de la tela forman un excelente conductor del calor desarrollado: este calor se difunde con rapidez por el tejido sin poder propagarse al lado opuesto del que está en ignicion. Más adelante

tendremos ocasion de ocuparnos de una importante aplicacion de esta propiedad de las telas metálicas á las *lámparas de seguridad* de Davy usadas por los mineros. El tejido metálico que rodea la luz basta para evitar la inflamacion y la explosion del *grisú*, de ese gas tan peligroso que se desprende en las minas de hulla.

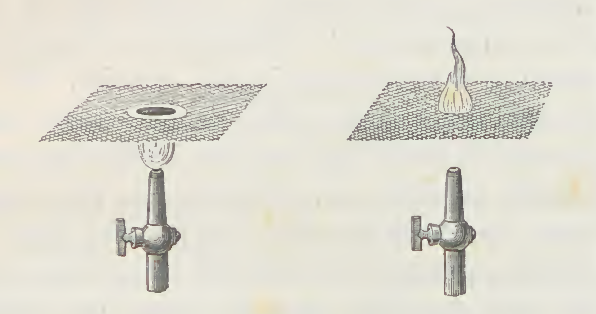


Fig. 129.—Propiedad de las telas metálicas: obstáculo que oponen á la propagacion del calor

El asbesto y el amianto son dos sustancias minerales sedosas, célebres por su incombustibilidad; y en efecto, son cuerpos malos conductores del calor, pudiéndose tener en la mano cubierta con un guante de amianto una bala hecha ascua, sin quemarse. En este caso, el calor no puede propagarse; queda interceptado: en el ejemplo precedente queda, por el contrario, absorbido con rapidez; y en ambos casos resulta limitada su propagacion por conductibilidad.

III

CONDUCTIBILIDAD DE LOS LÍQUIDOS Y DE LOS GASES

Los experimentos hechos para medir la conductibilidad de los líquidos y los gases prueban que es muy escasa. Sin embargo, vemos que el calor se propaga con bastante rapidez por unos y otros, pero entónces ya no es por conductibilidad, sino por *conveccion*, es decir, por trasporte de las partes caldeadas. Fácilmente se comprende la razon de semejantes movimientos. Cuando se caldea una porcion del líquido, disminuye su densidad, y por lo tanto, en virtud del principio de Arquímedes, esta porcion tiende á elevarse y á reemplazar á las capas más densas que hay sobre ella. Así sucede cuando se calienta un líquido por el fondo de la vasija que lo contiene; si se le calienta lateralmente, las corrientes que se establecen parten tan sólo de las paredes en lugar de salir de todas las partes del fondo. En este caso el caldeo es mucho ménos rápido. Por lo demás, fácil es demostrar la existencia de las corrientes de que tratamos. Basta mezclar con el líquido algunos polvos de la misma densidad que él, por ejemplo, aserrin mezclado con agua. Esta materia queda en suspension, y no bien se calienta la vasija, el movimiento de las partículas de arriba abajo y de abajo arriba, demuestra la existencia de las corrientes; las ascendentes proceden de las partes calentadas que se elevan; las descendentes de las partes frias más densas que reemplazan á las primeras; si se calienta la vasija lateralmente, las primeras circulan, durante el período de caldeo, á lo largo de las paredes de la vasija, y las segundas predominan en la parte central. Así pues, el calor se propaga de este modo por toda la masa del líquido.

Cuando éste se enfria, las corrientes cambian de direccion, siendo la central la que sube y las descendentes las que circulan junto á las paredes de la vasija. Su situacion relativa se explica fácilmente: cuando se calienta el recipiente, el calor se comunica primeramente al líquido por las paredes, y en el período de enfriamento se disipa tambien y desde luégo por ellas.

Con todo, si la vasija es ancha y profunda y se la calienta por debajo como en la figura 130, los movimientos son precisamente contrarios á los que acabamos de indicar, porque la parte central del fondo es la primera que comunica su calor al líquido.

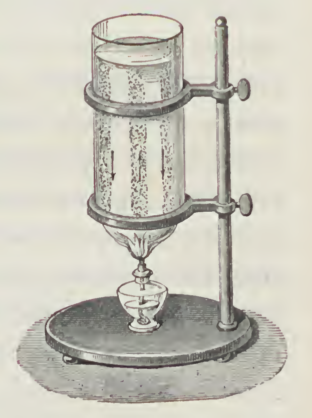


Fig. 130.—Corrientes ascendentes y descendentes en los líquidos

Rumford negaba la propiedad conductora de los líquidos; pero Murray combatió esta opinion con experimentos decisivos. Ponia el depósito de un termómetro sobre el fondo de un cilindro de hielo, lleno alternativamente de aceite y de mercurio, echaba éter en la superficie del líquido y le prendia fuego. En ambos casos, el termómetro subia muchos grados, no pudiéndose atribuir este aumento de temperatura á la comunicacion por las paredes del recipiente, puesto que el hielo absorbe el calor, ni á la radiacion sola, por cuanto el mer-

curio es atermano, ni por fin á las corrientes del líquido, por hallarse las capas más calientes y ligeras en la parte superior del cilindro.

Por consiguiente, la conductibilidad de los líquidos no es en modo alguno nula, y así lo ha probado Despretz calentando por la base superior una vasija cilíndrica de madera llena del líquido sometido al experimento. Para esto, ponia en contacto una vasija de cobre delgado A con la superficie del agua del tonel, por su parte superior; hacia pasar por el tubo C agua hirviendo que renovaba cada cinco minutos por el tubo D. Doce termómetros (en la figura 131 no se ven más que seis) cuyas bolas es-

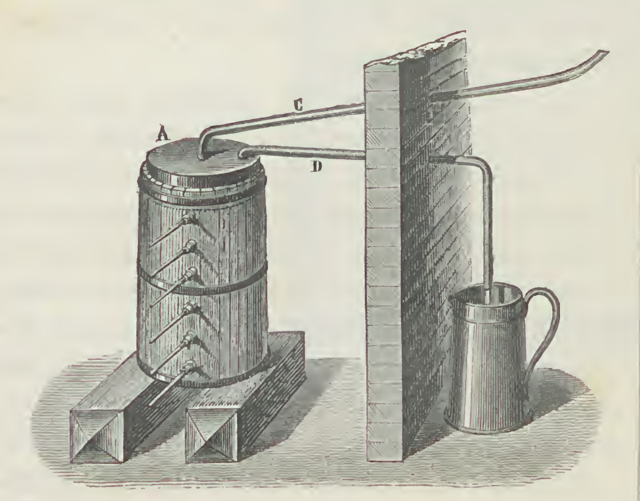


Fig. 131. — Experimento de Despretz sobre la conductibilidad de los líquidos

taban sumergidas en el líquido á diferentes alturas, servian para medir las temperaturas de la columna de agua. Fueron menester 36 horas para que quedasen estacionadas, y entónces marcaron temperaturas decrecientes desde las capas superiores hasta la mitad de la vasija, que tenia un metro de altura. Los seis termómetros inferiores apénas subieron. Despretz comparó las temperaturas de las capas sucesivas entre sí, y vió que obedecian á la misma ley que en el ejemplo de una barra metálica, de suerte que en los líquidos tiene efecto la propagacion del calor lo mismo que en los sólidos. Pero la conductibilidad de éstos es incomparablemente mayor que la de aquéllos.

No ha sido posible comprobar la de los gases, á causa de la dificultad con que se tropieza, al medir las temperaturas de las capas, de separar el caldeo procedente de la radiacion del de la mezcla de las capas entre sí, de modo que pueda distinguirse la parte únicamente emanada de la conductibilidad. Todo lo que se sabe es que son á no dudarlo muy malos conductores del calor. Las masas gaseosas se caldean, como las líquidas, por trasporte ó conveccion: gracias á su gran dilatabilidad, tan luégo como una porcion de masa gaseosa se calienta, ya por radiacion, ó bien por contacto, crece su volúmen, resultando de ello movimientos que mezclan las diferentes capas, y que trasportan el calor como en los líquidos, pero con rapidez mucho mayor. Por consiguiente, si se dificultan los movimientos de que hablamos, aprisionando el gas en los intersticios que las sustancias filamentosas, como el algodon, la lana, la seda en rama, el plumon, etc., dejan entre sus fragmentos, el gas se calienta con dificultad, segun resulta de los muchos experimentos hechos por Thomson. Ya hemos dicho ántes que á esta propiedad que tienen los gases de conducir mal el calor cuando están en reposo se debe en parte el que la ropa preserve el cuerpo de las pérdidas de calor cuando hace frio.

CAPITULO XIV

MANANTIALES DE CALOR.—MANANTIALES DE ORÍGEN CÓSMICO

I

EL CALOR DEL SOL: INTENSIDAD DE LA RADIACION SOLAR

Del estudio que acabamos de hacer de los fenómenos caloríficos resulta que dos ó más cuerpos puestos en presencia unos de otros establecen un cambio mutuo y continuo de calor, ya por radiacion y á distancia, ó bien por conductibilidad. Puede suceder que por causa de este cambio, haya equilibrio de temperatura; pero cuando no es así, cuando crece la temperatura de un cuerpo á expensas del calor que otro le envia, éste es para aquél un manantial de calor. Por tal concepto, un trozo de hielo á 0°, que es un *manantial de frio* para cualquier cuerpo colocado en su presencia y cuya temperatura está sobre cero, es, por el contrario, un *manantial de calor* para otro cuerpo cuya temperatura sea inferior á la del hielo.

En la acepcion vulgar, resérvase más particularmente la expresion de manantial ó foco de calor para los cuerpos dotados de elevada temperatura, que emiten sin intermision y durante un espacio de tiempo limitado, ó áun en apariencia indefinido, cierta cantidad de calor. Los sólidos y los gases incandescentes, lo que se llama fuego, llama, son manantiales de calor de esta clase; tambien se pueden clasificar en la misma categoría los cuerpos que emiten calor oscuro á temperatura elevada, por ejemplo, el agua en ebullicion. Mas para el físico todas estas distinciones son puramente arbitrarias: todo cuerpo, sean cualesquiera su temperatura y su estado, es un foco de calor, si en virtud de un modo cualquiera de propagacion, ya sea radiacion ó ya conductibilidad, difunde calor por el medio ambiente y por los cuerpos en este medio colocados.

Dase tambien con frecuencia el nombre de manantiales de calor á los varios modos de producirse éste; por tal concepto, el frotamiento, la percusion, la electricidad, la combustion, es decir, ciertas acciones físicas ó químicas, reciben el nombre de manantiales de calor. A nuestro juicio, hay en esto una confusion enojosa entre la causa y el efecto, porque en realidad son modos de produccion, y no manantiales de calor.

Por último, á veces se clasifican estos manantiales en permanentes y temporales ó accidentales, en naturales y artificiales, en cósmicos y terrestres; pero como estas clasificaciones no están basadas en la naturaleza misma de las cosas, no nos enseñarian nada más que el estudio particular de cada especie de manantial. Limitémonos pues á pasarlos revista unos tras otros, empezando por el más importante de todos, á lo ménos para la Tierra, por el Sol.

Este astro se compone de un núcleo incandescente, cuyos contornos claramente limitados forman el disco visible y cuya superficie es lo que se llama la *foto-esfera;* sobre esta superficie descansa una capa relativamente delgada de hidrógeno incandescente, de la cual parten llamaradas intermitentes de este mismo gas, y que ha recibido el nombre de *cromo-esfera.* Finalmente, por encima de esta hay una envolvente mucho más enrarecida y dilatada, cuya existencia solamente ha podido comprobarse durante los eclipses totales de Sol y que se llama la *corona.* Estas envolventes sucesivas del núcleo solar forman en su alrededor una atmósfera gaseosa más ó ménos compleja, pero eminentemente absorbente, como lo prueban el análisis del espectro solar y las numerosas rayas que lo surcan, segun hemos visto. Por lo que respecta al núcleo, los astrónomos no están acordes acerca de su naturaleza, pues miéntras unos lo consideran como un sólido ó un líquido incandescente, otros lo tienen por una masa gaseosa incandescente tambien. Más adelante diremos qué hipótesis se han formulado para ex-

plicar cómo se renueva y mantiene la inmensa provision de luz y de calor que radia en torno suyo en el espacio y cuya intensidad no parece haber variado perceptiblemente desde hace millares de años.

Pero, merced á los aparatos que vamos á describir, se ha podido medir esta intensidad tal cual llega á la superficie del globo terráqueo, cuando ha atravesado las capas atmosféricas; y teniendo en cuenta las horas de observacion ó las distintas alturas que el astro ocupaba sobre el horizonte, ha sido posible deducir de ellas la absorcion de calor que resulta de la interposicion de la atmósfera terrestre. Esta absorcion es un hecho que todos podemos comprobar, por cuanto vemos y experimentamos sus efectos; la intensidad de la accion directa de los rayos solares va creciendo á medida que crece su altura, llegando el máximum en el momento de su culminacion meridiana. Así tambien, esta intensidad máximum varía á su vez considerablemente, y por la misma razon, con la estacion del año (1).

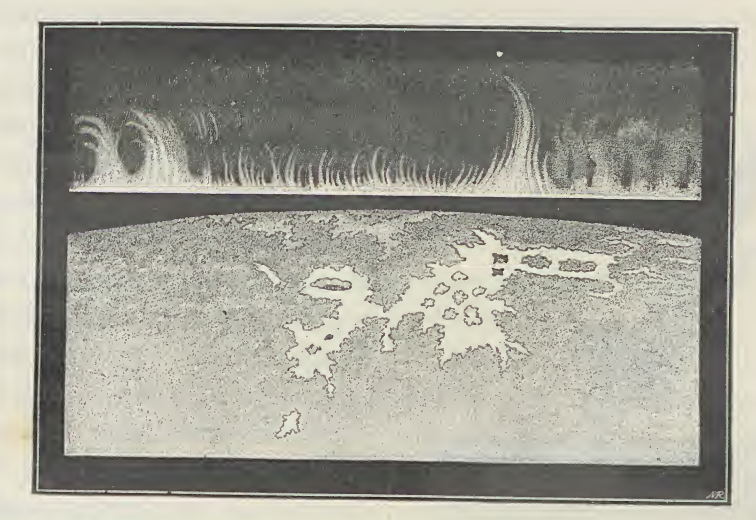


Fig. 132.—Estructura del Sol. Aspecto de la foto-esfera y de la envolvente cromo-esférica

De Saussure hizo los primeros experimentos acerca de este asunto. Este físico observaba con un aparato de su invencion, el *heliotermómetro*, el cual consistia en un termómetro invertido, cuya bola dada de negro ocupaba el interior de una caja de corcho, de paredes dadas de negro tambien, y cerradas con placas de vidrio. De Saussure exponia este aparato á la accion perpendicular de los rayos del Sol y anotaba el número de grados que subia el termómetro al cabo de un minuto.

Sir John Herschel hizo observaciones del mismo género en el Cabo de Buena Esperanza, valiéndose de un aparato análogo, al que daba el nombre de *actinómetro*.

Por último, Pouillet midió en París en 1837, la intensidad de la radiacion solar por medio de un método y de un instrumento que vamos á describir.

El instrumento de que se servia este físico para dicha medida, y al que llama *pirheliómetro*, es el representado en la figura 133. Como se ve, en su parte superior consiste en un vaso cilíndrico de plata muy delgada cuya cara vuelta al sol está dada de negro de humo. Este vaso ó recipiente está lleno de agua, marcando la temperatura del líquido un termómetro cuyo depósito penetra en el interior del cilindro y cuyo tubo está resguardado por otro de laton con una ranura longitudinal al través de la cual se ve el nivel del mercurio. En el otro extremo del tubo hay un disco del mismo diámetro que el recipiente cilíndrico, el cual recibe la sombra de este último, y permite comprobar si la superficie ennegrecida está expuesta perpendicularmente á la direccion de los rayos del sol, lo cual sucede cuando la sombra circular del disco superior cubre exactamente el inferior. Véase cómo se hace el experimento.

Empiézase por tomar nota de la tempera-

(1) Entiéndese que no debe confundirse la temperatura del aire, al sol, con el calor radiado directamente por el astro. A igualdad de altura, esta es la misma en invierno que en verano, cuando las condiciones relativas á la trasparencia del aire y á su estado higrométrico son las mismas; al paso que sucede lo contrario con la temperatura del aire. En las altas montañas, á la sombra y estando el cielo enteramente despejado, hace frio, miéntras que la radiacion solar es en ellas muy intensa, en razon del menor espesor de las capas aéreas y de la absorcion menor que es su consecuencia.

tura del instrumento, y luégo se expone su cara ennegrecida hácia una porcion de cielo sin nubes, pero de modo que no le dé el sol. A los cinco minutos la radiacion motiva cierto descenso de temperatura. Volviendo entónces el aparato hácia el sol, la cara ennegrecida recibe por espacio de otros cinco minutos el calor solar que cae perpendicularmente sobre

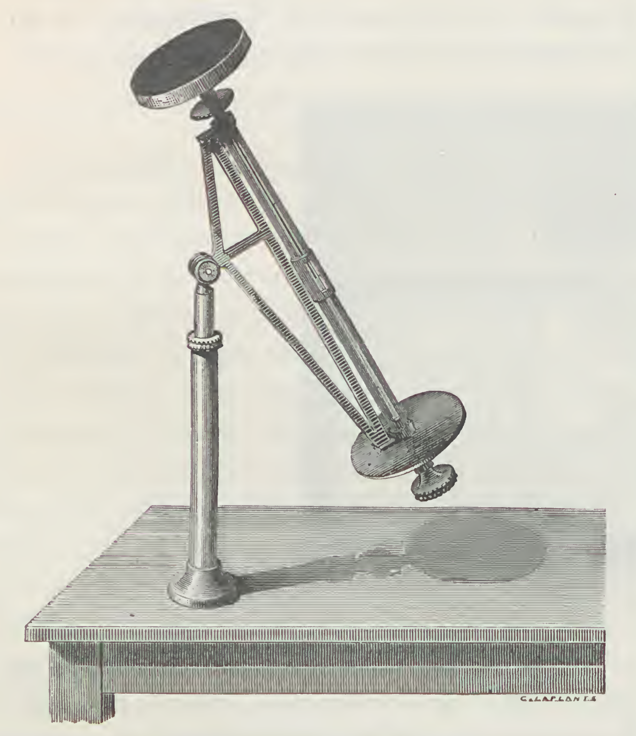


Fig. 133.—Pirheliómetro de Pouillet

ella, y se anota la elevacion de temperatura. Por último, se hace radiar de nuevo el instrumento durante cinco minutos en su primera posicion, y se vuelve á observar el enfriamiento final. La primera y tercera observaciones son necesarias para calcular la cantidad de calor perdido por la radiacion del aparato en el espacio durante su exposicion al sol, cantidad que es un término medio entre los dos enfriamientos observados. Agregándola al calor recibido á causa de la exposicion directa á los rayos solares, se tendrá la elevacion de temperatura total, y por consiguiente se podrá calcular el número de calorias absorbidas durante un minuto por una superficie igual á la del disco ennegrecido.

Como se comprenderá, esta cantidad de calor depende de la elevacion del sol sobre el horizonte, porque los rayos caloríficos de este astro han tenido que atravesar capas atmosféricas ántes de llegar á la superficie de la tierra, cuyas capas absorben una cantidad tanto más considerable de dichos rayos cuanto mayor es su espesor. Pouillet ha procurado averiguar la ley de la intensidad calorífica del sol á medida que varía la altura del astro, y ha deducido de ella la absorcion ocasionada por la atmósfera cuando el sol está en el zénit, absorcion que varía entre ciertos límites segun la pureza de la atmósfera, y que puede llegar á 0,25, es decir, á la cuarta parte del calor que recibiria el suelo si aquella no existiese. Considerando el calor total recibido por un hemisferio entero y por consiguiente con todas las oblicuidades posibles, se ve que la proporcion absorbida por la atmósfera si el cielo estuviese enteramente despejado, estaria aún comprendida entre los cuatro y cinco décimos del calor enviado por el sol á la tierra. Así pues, el suelo apénas recibe la mitad del calor solar, mitad que se distribuye desigualmente segun la oblicuidad de los rayos; la otra mitad caldea la atmósfera.

Suponiendo distribuido con uniformidad el calor que á la tierra llega, Pouillet ha calculado que un centímetro cuadrado recibe 0,441 caloria por minuto; es decir la cantidad de calor suficiente para elevar un grado la temperatura de $0^{gr},441$ de agua. En un año, cada centímetro cuadrado recibe 231,675 calorias: la cantidad de calor recibido en un año por la tierra entera seria bastante para derretir una capa de hielo de 31 metros de espesor que rodeara todo el globo.

De la cantidad de calor recibida anualmente por la Tierra se puede deducir el calor total radiado por el Sol en el espacio. Para esto basta calcular cuántas veces está contenida la superficie de un círculo máximo terrestre en la superficie de una esfera que tuviese por centro el del Sol y por radio la distancia de este astro á nuestro globo. Un cálculo fácil da por resultado 2,150.000,000; de suerte que el calor interceptado por la tierra es tan sólo la 2,150.000,000 ^{a}. parte de la radiacion solar entera. «Si el calor emitido por el Sol, dice Tyndall, se invirtiese en fundir una capa de hielo depositado en su superficie, liquidaria en una hora un espesor de 732 metros. En el mismo espacio de tiempo elevaria á la temperatura de la ebullicion 2,900.000,000 miriámetros cúbicos de agua á 0°. En otros términos, el calor emiti-

do por el Sol en una hora es igual al que engendraria la combustion de una capa de hulla de tres metros de espesor, que rodeara al astro; por último el calor solar emitido en un año equivale al que produciria la combustion de una capa de hulla de 27 kilómetros de espesor.»

Tal es, segun los experimentos de Pouillet, la intensidad del inmenso hogar que suministra á la Tierra y á los demás planetas su provision de calor, ó lo que es lo mismo, su provision de vida y de fuerza mecánica, segun luégo veremos.

Varios físicos han vuelto á medir, con posterioridad á Pouillet, la accion calorífica de los rayos solares, ya en la superficie del suelo y con diferentes oblicuidades, ya en el límite de la atmósfera teniendo en cuenta la absorcion por las capas de aire. Antes de consignar los resultados obtenidos, digamos algo acerca de las observaciones hechas de 1832 á 1842 por Forbes y Kæmtz en Brienz y en el Faulhorn con el heliotermómetro de Saussure, es decir, en dos puntos cuya diferencia de altitud es de 2119 metros. Segun estos físicos, el haz de rayos caloríficos solares se divide al penetrar en nuestra atmósfera en dos partes, una de ellas compuesta de los rayos fácilmente absorbibles y otra de los que se resisten á toda extincion; los primeros forman los ocho décimos, y los segundos los dos décimos del haz total. Por lo tanto, la atmósfera es termocróica, segun lo han demostrado tambien los experimentos de Melloni. En 1853, de Gasparin hizo investigaciones relativas á la influencia de la radiacion solar sobre la vegetacion; el aparato de que se sirvió se componia de una bola de cobre de 10 centímetros de diámetro, cubierta de dos capas de barniz mate con negro de humo, cuya bola contenia interiormente el depósito de un termómetro muy sensible. Los experimentos que hizo en febrero en Tarascon, le demostraron que la atmósfera absorbia entónces los 0,32 de la radiacion solar total. En mayo el mismo aparato daba, en Versalles, 0,57 á las ocho de la mañana, 0,27 á las doce y 0,24 á las seis de la tarde. Estos resultados concordaban con los de Pouillet.

En estos últimos años se ha reproducido la cuestion, y aumentado el valor numérico de la constante solar, deducida de nuevas observaciones. Empleando M. Crova, unas veces el pirheliómetro directo de agua de Pouillet (1), otras veces el mismo aparato en que el agua está reemplazada por mercurio, y otras en fin un actinómetro formado de un gran termómetro de alcohol cuya bola ocupa el centro de una vasija esférica ennegrecida, hizo en 1875 muchas observaciones de las cuales resulta un valor de la constante solar algo mayor que el de Pouillet. El promedio de las cifras deducidas da $2^c,015$ como cantidad de calor recibida por minuto en un centímetro cuadrado en los límites de la atmósfera. Las observaciones, hechas primeramente en Montpellier, se continuaron en el campo y á orillas del mar para evitar las causas de error dimanadas de una absorcion anormal de calor por los vapores, el humo y el polvo, causas de error que, por lo demás, varian con el grado de agitacion del aire y con la direccion del viento.

Durante el mismo año, M. Violle procuró tener en cuenta la influencia que puede ejercer sobre la absorcion atmosférica la cantidad de vapor de agua contenida en el aire. A este efecto, hizo que otro observador, M. Margollet, efectuase las medidas actinométricas al pié del monte Blanco, miéntras él medía la energía de la radiacion solar en la cumbre y en las laderas de la montaña. Empleando un método distinto del de Pouillet, M. Violle ha deducido como valor de la constante solar $6^o,958$, número algo mayor que el de $6^o,72$, obtenido por aquel físico. De aquí resultan $2^c,54$ como cantidad de calor que cae durante un minuto en un centímetro cuadrado, en el límite de la atmósfera, cifra que excede mucho del resultado obtenido por Pouillet, ó sea $1^c,7633$.

Es interesante comparar la influencia de la

(1) Además del pirheliómetro anteriormente descrito, al cual daba Pouillet el nombre de *pirheliómetro directo*, este físico se valia de un *pirheliómetro de lentes* para el caso en que no se pudieran hacer los experimentos con el aire tranquilo. La modificacion introducida por Crova en el pirheliómetro de Pouillet consiste en sustituir el negro de humo, usado como capa absorbente, con un depósito galvanoplástico ligeramente rugoso que cubria la caja cilindrica del aparato; sobre esta capa de cobre habia otra de negro de platino íntimamente adherente, y por último, encima de la superficie platinada se extendia una ligera capa de negro de humo. Segun Crova, exponiendo á la luz solar la superficie bruñida de la caja de plata cubierta de una ó muchas capas de humo, como lo hacia Pouillet, la absorcion del calor era incompleta; una parte del calor oscuro, reflejada por la superficie metálica bruñida, atravesaba el negro de humo, que es diatermano para estas radiaciones. Tyndall habia reemplazado ya con mercurio el agua del pirheliómetro Pouillet, en cuyo caso la caja que contenia el líquido era de acero y no de plata.

absorcion atmosférica á diferentes altitudes; véase á este efecto el cuadro siguiente calculado por M. Violle:

	Altitudes	Calor recibido
Límite de la atmósfera.	»	2c,540
Cumbre del monte Blanco. . .	4810m	2c,392
Grands-Mulets.	3050	2c,262
Glaciar de los Bossons.	1200	2c,022
Llano de Paris.	60	1c,745

Como se ve, la energía de la radiacion solar que, ateniéndonos á los cálculos de Pouillet, nos parecia ya tan incomparablemente pujante, es todavía mayor segun las más recientes determinaciones. Introduciendo estas nuevas cifras en los enunciados del ilustrado físico, deberemos expresar del modo siguiente la intensidad de la radiacion calorífica del Sol.

«Si la cantidad total de calor que la Tierra recibe del Sol en el trascurso de un año estuviese distribuida con uniformidad en todos los puntos del globo, y se invirtiese sin pérdida alguna en fundir hielo, seria capaz de derretir una capa de hielo que envolviese la Tierra entera y tuviese $33^{m},4$ de espesor, si se adoptan las cifras de M. Crova, y de $42^{m},1$ si las de M. Violle.»

Así tambien: «Si la cantidad total de calor emitida por el Sol se emplease exclusivamente en fundir una capa de hielo que se aplicara sobre la superficie del Sol y lo envolviera enteramente, esta cantidad de calor seria capaz de derretir en un minuto una capa de $12^{m},8$ ó de $16^{m},0$ y en un dia una capa de 28 ó de 37 kilómetros.»

Debemos añadir con Pouillet que estas determinaciones son independientes de toda hipótesis sobre la naturaleza propia del Sol, de la materia que lo compone, de su poder radiante, de su temperatura y de su calor específico. Pero la mayor ó menor exactitud de dichas determinaciones depende de la de los experimentos que han servido para medir radiaciones en la superficie de la Tierra, y sobre todo de la ley que expresa la absorcion atmosférica.

II

TEMPERATURA DEL SOL

Los astrónomos se han ocupado de otras cuestiones relativas á las radiaciones solares, tratando, por ejemplo, de averiguar si estas radiaciones son de igual intensidad en las diferentes regiones del astro, en las zonas polares y en la ecuatorial; si uno de los hemisferios envia á la Tierra más calor que el otro; si la temperatura de las manchas, en sus núcleos y en sus penumbras, es mayor ó menor que la de la foto-esfera y de las manchas brillantes ó fáculas. Suponiendo que las radiaciones de estas diferentes partes fuesen sensiblemente desiguales, compréndese que de ello pudieran resultar efectos que interesaran á nuestro planeta y que en cierto modo pudieran preverse, por cuanto el número y extension de las manchas varía periódicamente. Algunos sabios, como Secchi, Chacornac, Langley, etc., han hecho experimentos con objeto de dilucidar estos puntos de astronomía física: acerca de ellos, remitimos al lector á las obras especiales en que se han incluido.

Otra cuestion más difícil y cuya solucion trae aún divididos á los sabios, tanto físicos como astrónomos, es la de la temperatura del Sol; y en efecto, es sobrado compleja. En el estado actual de los conocimientos astronómicos, el Sol no es una masa homogénea; se compone de un núcleo esférico, en el que no puede penetrar nuestra vista, á no ser que se consideren las manchas que lo salpican accidentalmente como aberturas que dejan columbrar la masa central y la seccion de sus distintas capas. La foto-esfera ó superficie exterior que limita el núcleo se considera como el foco principal del que emanan las radiaciones solares; pero está rodeada á su vez de una capa de variable espesor y en cuyo seno se engendran las protuberancias; esta capa es la cromo-esfera, formada en gran parte de hidrógeno incandescente. Finalmente, más allá de la cromo-esfera hay una atmósfera mucho más dilatada y más enrarecida, cuya presencia origina el fenómeno de la corona durante los eclipses totales de Sol.

El núcleo solar y sus envolventes sucesivas se hallan, bajo el punto de vista que nos ocupa, en estados físicos muy diferentes sin duda; en ellos ocurren fenómenos químicos mal definidos todavía, á pesar de los interesantes descubrimientos de que el análisis espectroscópico ha dotado á la ciencia, no siendo dudoso que, desde el núcleo interno hasta las capas exteriores de la foto-esfera, la cromo-esfera y la

corona, la temperatura varíe en límites muy extensos. De todos modos, si se trata de valuar esta temperatura experimentalmente, es decir, partiendo de la medida de la intensidad de la radiacion solar, tal como se puede efectuar en la superficie de la Tierra, es desde luégo evidente que podrá servir de punto de partida la resultante de las acciones de las diferentes capas, y no aisladamente la radiacion de la superficie del núcleo, por ejemplo, segun se entiende generalmente cuando se habla de la temperatura del Sol. Las distintas capas que rodean este núcleo ejercen en las radiaciones foto-esféricas una absorcion cuya intensidad total no podemos valuar, ni tampoco la que es especial y propia de los rayos caloríficos de tal ó cual refrangibilidad. Los numerosísimas rayas que surcan la parte luminosa del espectro solar, nos informan, á la verdad, acerca de la absorcion de esta parte importante de las radiaciones solares, pero no sobre la absorcion de que puede ser objeto la parte oscura, la más considerable por el concepto calorífico, por parte de la cromo-esfera ó de la atmósfera solar exterior.

Por consiguiente, cuando se trata de medir la temperatura solar, debe atenderse á la media ó resultante, procedente de las acciones combinadas de las diferentes partes constitutivas del Sol. Pero áun restringida de este modo, la solucion del problema continúa indeterminada; porque para obtenerla, se han de hacer hipótesis sobre un elemento de capital importancia, sobre el valor radiante ó emisivo de la sustancia de que se compone el Sol. ¿Se halla ésta en estado sólido ó líquido, como algunos físicos y astrónomos lo suponen todavía hoy? ¿Es por el contrario gaseosa, segun lo sostienen otros sabios, considerando la envolvente foto-esférica ó visible como si estuviera formada de una acumulacion de nubes constituidas por partículas líquidas ó sólidas incandescentes, ménos calientes que las capas internas y puramente gaseosas del astro? De la respuesta que se dé á estas preguntas debe resultar la mayor ó menor probabilidad de las hipótesis propuestas sobre el valor numérico del poder emisivo del Sol.

Cuando Pouillet hubo valuado la intensidad de la radiacion solar, segun hemos visto en el artículo anterior, procuró deducir de ella la temperatura probable del Sol. Partiendo de la fórmula de Dulong y Petit que da la ley del enfriamiento en el vacío, ha encontrado una relacion simple entre la cantidad de calor emitida en un minuto por la unidad de superficie del cuerpo radiante, su poder emisivo y su temperatura. Luégo, suponiendo sucesivamente que el poder emisivo del Sol es igual á la unidad, es decir máximum, ó bien solamente igual á 0,1, como el de los metales bruñidos, deduce las temperaturas de 1461° ó 1761°, la primera de las cuales es casi la de la fusion del hierro, al paso que la segunda llega á la del platino.

Varios astrónomos han propuesto otras cifras, mucho mayores. El doctor Zœllner, partiendo de la hipótesis de que el núcleo solar es un sólido incandescente cubierto de una capa líquida incandescente tambien, y considerando las protuberancias como engendradas por erupciones gaseosas salidas del núcleo á enorme presion, ha deducido de ciertas consideraciones termodinámicas que no podemos mencionar aquí, una valuacion de la temperatura de los gases en la atmósfera del Sol, la cual en su concepto no baja de 27,700°, y varía entre 68,000 y 75,000 en las masas gaseosas en el momento de su salida de las capas subyacentes.

El P. Secchi admitia una temperatura todavía mayor, calculándola, con Watterston, en 9 ó 10 millones de grados. Su punto de partida era una serie de medidas actinométricas efectuadas en la India por el segundo de dichos físicos, el cual habia obtenido 27° como elevacion de temperatura de un termómetro sometido á la radiacion solar en un recinto dado de negro. Ericsson deducia por su parte 2.290,000°. Por último, aplicando Secchi el mismo cálculo á los resultados de las observaciones de M. Soret (en el monte Blanco) y de M. Violle, se decidia por cifras de 5 millones ó de 3 millones de grados.

La enorme discordancia entre los resultados que acabamos de mencionar y los de Pouillet, por más que unos y otros se hayan obtenido en virtud de diferentes procedimientos de observacion, no pueden atribuirse á errores resultantes de estos procedimientos. Y en efecto, Violle, Crova y Vicaire, partiendo de los mismos

datos ó de sus propias observaciones (mencionadas más arriba), han deducido para la temperatura del Sol varias cifras que no se diferencian marcadamente de las que la experiencia ha permitido comprobar en los más intensos focos caloríficos terrestres. M. Vicaire adopta 1398°, número poco diferente del de Pouillet; M. Violle, partiendo de sus medidas actinométricas en el monte Blanco, llega á una cifra próxima á 1500°.

En resúmen, las valuaciones de los físicos franceses que acabamos de nombrar, dan como temperatura media probable del Sol un número de grados inferior á los que marcan las altas temperaturas de los hogares de nuestras fábricas y laboratorios; y teniendo en cuenta las incertidumbres que aún reinan sobre ciertos puntos del problema, esta temperatura debe ser enteramente comparable á la de nuestras llamas, y comprendida entre 2000° y 3000°.

¿De dónde procede pues la extraordinaria diferencia entre esta valuacion y los cálculos de Secchi, Watterston y Ericsson, que asignan millones de grados á la temperatura solar? Dimana casi por completo de la diferencia de interpretacion de los resultados de las observaciones actinométricas, y no de las observaciones en sí, á las que se puede considerar como suficientemente concordantes. Al paso que Secchi aplica á estos resultados la ley de Newton sobre el enfriamiento, Vicaire, Crova y Violle se valen de la fórmula que da la ley de Dulong y Petit (1). Parece evidente que en este caso y para las elevadas temperaturas que se trate de medir, es inaplicable la primera ley; pero la segunda se ha comprobado en condiciones que se relacionan con aquellas en que se encuentran probablemente las sustancias de que se compone la materia solar. Por otra parte, hablar de millones de grados respecto á una temperatura, es ciertamente salir de todos los datos de la experiencia, y como ha dicho muy bien, con este motivo, Enrique Saint-Claire Deville, «hablar de temperaturas excesivas y de su medida, equivale á admitir que los gases son excesivamente dilatables ó compresibles por el calor, lo cual no está aún demostrado; ó, lo que lo está ménos todavía, que no hay límite para la temperatura producida por las combinaciones químicas. En la duda, abrigo la opinion, fundada en mi larga experiencia de las temperaturas elevadas, de que las que producimos y medimos en nuestros laboratorios no son muy inferiores á las de la naturaleza.

»Hablar de la *superficie* del Sol, es suponer que se parece á una bala roja. Hablar de la temperatura en la superficie de la atmósfera solar, es suponer que termina bruscamente en una capa incandescente. Por último, calcular la temperatura de un punto cualquiera de la masa del Sol, valiéndose de medidas fotométricas, actinométricas, etc., es despreciar absolutamente la influencia de la capa, quizás sumamente dilatada, de la materia solar oscura que, segun toda apariencia, se sobrepone á la capa incandescente, y cuya radiacion hácia la Tierra se desprecia por lo mismo. Así pues, en todos estos cálculos, sólo puede ser cuestion de cantidades de calor emanadas del Sol entero y no de temperaturas tomadas en su *superficie*.

»Hé aquí tal vez un modo de abordar la cuestion. Las rayas del hidrógeno que emiten ciertos puntos de la materia incandescente del Sol están determinadas por las observaciones astronómicas. Frankland y Lockyer las han visto en la llama del hidrógeno sometido á cierta presion.

Por el método que he descrito ya, se podria determinar la temperatura de combustion del hidrógeno á esta misma presion; y por consecuencia la temperatura y la presion de los gases en los puntos de la atmósfera solar en que se han observado las rayas del hidrógeno. Segun mis primeras apreciaciones, creo que esta temperatura no distará mucho de 2500 ó 2800°, cifras que resultan de los experimentos de Bunsen y de los que Debray y yo hemos publicado hace tiempo.»

---

(1) La ley de Newton sobre el enfriamiento de los cuerpos se enuncia de este modo: *La cantidad de calor que todo cuerpo pierde por radiacion en el vacío, durante la unidad de tiempo y para la unidad de superficie, es proporcional al exceso de su temperatura sobre la del recinto.* Por desgracia esta ley sólo es exacta relativamente á escasos excesos de temperatura, y no se la puede aplicar al caso de la radiacion solar.

Con respecto á las temperaturas elevadas, la radiacion crece más rápidamente que ellas, y entónces la ley de Dulong y Petit parece la única aplicable. Segun ella, las cantidades de calor radiadas crecen en progresion geométrica, al paso que las temperaturas sólo crecen en progresion aritmética.

III

TEMPERATURA DEL ESPACIO INTERPLANETARIO

Segun acabamos de ver, las dudas que aún subsisten sobre la verdadera temperatura del Sol reconocen por causa, más bien la incertidumbre en que se está acerca de la aplicacion de la ley que enlaza las radiaciones con la temperatura, que las inexactitudes de las observaciones mismas. Estas son bastante concordantes para que se puedan calcular las cantidades de calor que llegan á la superficie del suelo, á causa de la radiacion solar, así como el que recibe la unidad de superficie, en la unidad de tiempo, en los límites de nuestra atmósfera. En resúmen, la energía calorífica de la radiacion del Sol es un elemento conocido ya con suficiente aproximacion, y tal, que cada centímetro cuadrado de esta superficie límite recibe en un minuto dos calorias, ó lo que es lo mismo, es capaz de elevar en este espacio de tiempo dos grados centígrados la temperatura de un gramo de agua.

Pero la Tierra no recibe únicamente del Sol su calor externo. Todos los astros radian hácia ella; y como, segun nos enseña la astronomía, las estrellas especialmente no son otra cosa sino soles, esto es, cuerpos en estado de incandescencia, manantiales de luz y de calor; y su considerable número puede hasta cierto punto compensar la atenuacion que sus radiaciones sufren á causa de sus enormes distancias, se puede plantear la cuestion que consiste en apreciar la cantidad de calor que envian á la Tierra.

Gracias á la delicadeza del análisis espectral, quizás llegue un dia en que se encuentre en la constitucion de las luces estelares indicios que permitan clasificarlas con arreglo al puesto que ocupan en la escala de las temperaturas. Sábese ya que no todas las estrellas son iguales por lo que atañe á su constitucion física; pues miéntras que el espectro de unas está surcado de rayas como el solar, otras sólo dan algunas líneas brillantes en un espectro continuo; y otras un espectro caracterizado por bandas acanaladas; siendo evidente que la luz con que todas ellas brillan indica la incandescencia de la materia que las compone, y por consecuencia una elevada temperatura; y que las diferencias probablemente dimanarán de una absorcion electiva en el seno de atmósferas de espesores y constituciones variables.

Por fortuna no es necesario resolver estas cuestiones difíciles para abordar la relativa á la determinacion de la cantidad total de calor que las estrellas radian hácia nuestro globo. Como todas estas radiaciones, que son en número infinito, se cruzan á la vez en cada punto del espacio que nos rodea, puede admitirse que la resultante de todas sus acciones combinadas es la misma en una region del cielo bastante dilatada para que podamos considerar todos sus puntos como si estuvieran situados á igual distancia de cualquiera de ellos. Tal es, por ejemplo, el espacio en que se mueve la Tierra durante su revolucion anual alrededor del Sol. Sólo que, para resolver el problema, se necesitará poder eliminar el efecto preponderante debido á la radiacion solar.

Así pues, la cuestion planteada en estos términos, es la siguiente: ¿Qué temperatura marcaria un termómetro colocado en un punto del espacio interplanetario, y resguardado por una pantalla de la accion directa de la radiacion del Sol?

Véase cómo logró resolverla Pouillet en su Memoria de 1838:

«Un termómetro, dice, expuesto en el suelo á la radiacion nocturna, recibe calor de dos focos diferentes, á saber, del espacio y de la atmósfera. Estando sometido el calor del espacio á la absorcion lo propio que el calor solar durante su trayecto atmosférico, por lo general sólo los 0,3 ó los 0,4 pueden llegar al termómetro; esto, suponiendo que el experimento no se hace en las altas montañas. El calor emitido por la atmósfera misma en el curso de la noche, es efecto de la radiacion individual de todas las capas concéntricas que se puedan concebir desde el nivel del mar hasta los límites de la atmósfera, y depende por consiguiente de la distribucion de las temperaturas en toda la altura de la columna atmosférica, pudiendo por mi parte agregar que su influencia es mucho mayor de lo que se ha creido hasta ahora. Por lo demás, cualquiera que sea la relacion de las intensidades de ambas causas, es evidente que se puede suponer una causa sola capaz de producir un efecto igual al que resulta de su accion simultánea; ó, en otros términos, se puede su-

primir con el pensamiento el calor del espacio y el de la atmósfera y concebir un recinto de poder emisivo máximo, cuya temperatura sea tal, que envie al termómetro y al suelo tanto calor precisamente como uno y otro reciben á la vez de la atmósfera y del espacio: la temperatura desconocida de este *recinto zenital* es lo que yo llamo *temperatura zenital*.

»Este modo de concebir los fenómenos no tiene por objeto representar las acciones particulares y quizás desiguales que el termómetro experimenta en esta ó la otra direccion, sino tan sólo demostrar con exactitud la accion definitiva y total á que está sometido, de suerte que su descenso bajo la temperatura ambiente sea el mismo con el recinto zenital que con la atmósfera y el espacio reunidos. Con esta condicion podemos dar á dicho recinto una temperatura uniforme en todas las porciones de su extension. Por último, no cabe duda de que la temperatura zenital es necesariamente variable á cada instante para el mismo punto de la superficie de la Tierra y con mayor motivo variable de un punto á otro, porque se compone de un elemento fijo que es la temperatura del espacio, y de otro que cambia sin cesar, cual es la temperatura de las diferentes capas atmosféricas.»

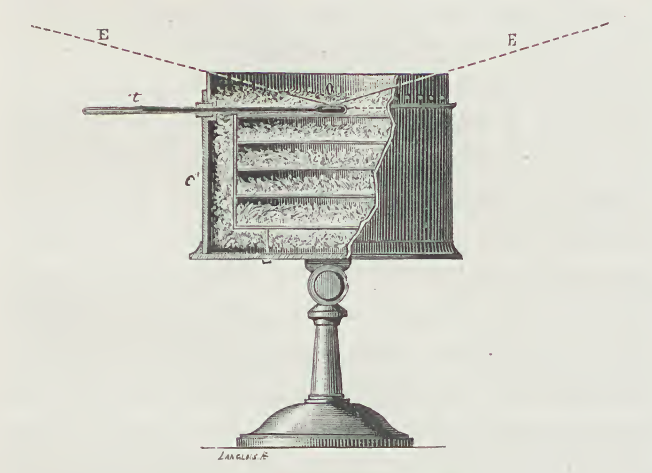


Fig. 134.—Actinómetro de Pouillet

Pero ¿cómo observar ó calcular esta temperatura ideal? Pouillet se valia con este objeto del aparato representado en la fig. 134. En un cilindro de plaqué de plata hay cuatro anillos cilíndricos superpuestos, cada uno de los cuales está guarnecido interiormente de plumas de cisne, siendo su fondo de piel de esta ave. El cilindro está tambien envuelto en otra piel de cisne, y en la cara exterior del plumon hay un termómetro *t*, en cuyo tubo exterior se marca la temperatura del aparato.

Todo esto va metido en un cilindro mayor C', estando calculado su reborde superior de tal suerte que el depósito O del termómetro no ve más que los dos tercios EOE de la superficie hemisférica del cielo.

El actinómetro de Pouillet, expuesto toda la noche á la radiacion del cielo, marca temperaturas siempre más bajas que las de un termómetro colgado á alguna distancia del suelo y al aire libre, pero siempre más altas que la temperatura zenital buscada, puesto que sólo ve las dos terceras partes de la superficie del cielo y está rodeado de una capa de aire que lo calienta. La cuestion estaba en encontrar una relacion entre estas tres cantidades: la temperatura del aire ambiente, la del actinómetro, ambas dadas por la observacion, y la zenital. Pouillet ha procurado averiguar cuál era esta relacion poniendo el actinómetro bajo un cielo artificial, formado de una vasija de zinc de un metro de diámetro, sostenido á dos metros de altura por tres columnas delgadas; esta vasija, dada de negro en el fondo, estaba llena de una mezcla frigorífica á —20°. Colocaba el actinómetro verticalmente debajo y á diferentes distancias, y tomaba nota de las temperaturas cuando quedaba establecido el equilibrio, De este modo vió que se obtenia siempre la temperatura del cielo artificial, si se deducia de la ambiente dos veces y cuarto el exceso de esta temperatura sobre la del actinómetro.

Las observaciones hechas con arreglo á este método, y la temperatura zenital deducida en virtud de esta regla, han demostrado que esta temperatura baja progresivamente desde la puesta del Sol hasta su salida, como la del aire. De aquí ha deducido Pouillet que, «puesto que la temperatura zenital experimenta en una sola noche variaciones considerables, es una prueba evidente de que el término fijo (la radiacion del espacio) que entra en su expresion, sólo tiene un reducidísimo valor con relacion al término variable (la radiacion atmosférica), y por consiguiente que en la radiacion nocturna, el calor del espacio es insignificante con relacion al procedente de la radiacion de la atmósfera.

Obtenidos estos datos, Pouillet demuestra que la temperatura del espacio está unida, por una

relacion que calcula, con las dos constantes que representan el poder absorbente de la atmósfera, por una parte respecto del calor terrestre, y por otra respecto del calor del espacio, de lo cual deduce por último, como temperatura del espacio, un número comprendido entre 115° y 175° bajo cero. «Los únicos experimentos que he podido hacer, dice, permiten llegar ya á cierta aproximacion; me dan —142° como temperatura del espacio, valor que no creo muy distante de la verdad.»

Fourier habia indicado ya ántes que Pouillet, pero en términos generales, que la temperatura del espacio interestelar era algo inferior á 50° ó 60° bajo cero, es decir, á la de las regiones polares terrestres. La nueva determinacion la hace mucho más baja, de suerte que si se la adopta provisionalmente, se debe considerar que el frio que reina en los espacios interplanetarios aventaja en rigor y crudeza al más intenso de cuantos hayamos podido producir por medios artificiales, y con mayor motivo, al que se haya observado en la superficie de la Tierra,

Así pues, esos innumerables soles, esa muchedumbre de estrellas que todas las noches vemos diseminadas por la inmensidad, al radiar todas juntas, excepto el Sol, envian al espacio una cantidad de calor igual á la que recibiria la Tierra si estuviese rodeada de una envolvente de poder emisivo máximum, cuyas paredes estuvieran siempre á una temperatura de 142° bajo la del hielo fundente.

Esta cantidad de calor que la cifra —142° nos hace á primera vista considerar como enteramente despreciable, que á muchas personas les pareceria casi ménos que nada, ¿es caso de despreciar? Vamos á ver que no.

Basta para esto calcular el efecto total que produciria el calor del espacio si se invirtiese por completo en derretir hielo. En un año, la cantidad de hielo derretido no seria inferior á la de una capa de 26 metros de espesor que rodease á toda la Tierra. Hemos visto que el calor del Sol fundiria en el mismo tiempo una capa de hielo de 31 metros. Por consiguiente la energía de la radiacion estelar llega á los cinco sextos de la de la radiacion solar. «Causará sin duda extrañeza, dice Pouillet al consignar estas cifras, que el espacio, con la temperatura de —142°, pueda dar á la Tierra tan considerable cantidad de calor que resulta ser casi igual al promedio de calor que recibimos del Sol; á primera vista, parecen estos resultados tan contrarios á la opinion que se tiene, ya sea del frio del espacio, ó ya de la potencia del Sol, que tal vez se los considerará inadmisibles. Hay que observar sin embargo que, con respecto á la Tierra, el Sol ocupa las 5 millonésimas de la bóveda celeste, y por consiguiente que debe enviar doscientas mil veces más cantidad de calor para producir el mismo efecto.»

IV

CALOR EMITIDO Á LA TIERRA POR LA LUNA

¿La Luna ejerce una influencia calorífica apreciable sobre la Tierra? Esta cuestion ha sido objeto de muchos trabajos, cuyos resultados vamos á indicar rápidamente. Un físico italiano, Montanari, fué segun Zantedeschi el primero que reconoció en 1685 la influencia calorífica lunar, y un siglo despues, otro italiano, Paolo Frisi, vino á parar al mismo resultado; ambos se valian de lentes y espejos para concentrar los rayos del astro en la bola de un termómetro. En la primera de las citadas fechas los termómetros eran aún muy poco sensibles, de suerte que la observacion de Montanari apénas puede inspirar confianza. Casi hácia al mismo tiempo, Tschirnhausen no pudo notar efecto sensible en la radiacion lunar con una lente de 33 pulgadas de diámetro, bastante poderosa para fundir metales por la concentracion de los rayos solares. Lahiere hijo no fué más afortunado en 1705. «Expuso, dice Lalande, el espejo cóncavo del Observatorio, que tiene 35 pulgadas de diámetro, á los rayos de la luna llena, cuando pasaba por el meridiano en octubre de 1705, y reunió estos rayos en un espacio 306 veces más reducido que en el estado natural; á pesar de lo cual esta luz concentrada no produjo el menor efecto en el termómetro de M. Amontons, que era muy sensible.»

Hagamos tambien mencion de otros experimentos asimismo infructuosos de Peclet y Prevost, que han observado un descenso de temperatura; de Forbes, que operaba con un termomultiplicador y una lente que concentraba 6000 veces; de Tyndall, que atribuye el malogro

de sus tentativas á la atmósfera inestable de Lóndres.

El primer experimento decisivo de esta cuestion interesante de física celeste, es de Melloni, y data de 1846. Merece que lo reproduzcamos con todos sus detalles, tomándolos del texto mismo del autor, porque nos hará comprender qué precauciones se necesitan, en observaciones tan delicadas, para evitar las causas de error dimanadas de fenómenos accidentales.

«Acababa yo de recibir una lente de escalones, de un metro de diámetro, construida por M. Lepaute, y destinada al observatorio meteorológico del Vesubio. Para estudiar sin riesgo el ajuste de sus varios anillos así como la distancia y extension del foco, expuse este magnífico instrumento de óptica á la clara luz de la luna, y puse la lente, merced al doble movimiento de rotacion de que es susceptible, en un plano exactamente perpendicular á la direccion de los rayos. La luz que daba en la superficie de la lente se concentró, á cosa de un metro de distancia, en un espacio circular de un centímetro de diámetro. Al ver este circulito brillante y perfectamente limitado, y de un tamaño igual ó poco ménos á la seccion de los tubos que guarnecen mis pilas termoscópicas, ocurrióseme la idea de probar qué accion ejerceria en ellas. Hice al punto los preparativos necesarios para efectuar el experimento, y noté que tan luégo como los rayos penetraron en el interior del tubo y dieron en la cara exterior del aparato, sobrevino una desviacion considerable en el reómetro multiplicador. Asombrado de la vivacidad de esta accion, y sospechando que dimanase del calor lunar, puse la mano delante y á cierta distancia de la abertura, y el índice del reómetro volvió al punto á cero, pasó de él, y tomó una desviacion contraria, prueba evidente de que su movimiento primitivo derivaba de un rayo *frigorífico*, es decir, de un descenso de temperatura en la cara de la pila expuesta al foco. Fácil era asignar el orígen de este frio. Como la lente estaba en una galería descubierta y el cielo enteramente despejado, á causa del gran poder emisivo del vidrio debia radiar su calor en abundancia hácia el espacio y descender su temperatura bajo la de la pila, que estaba metida en su estuche metálico y dentro de la habitacion. Miéntras la pila estaba tapada, la débil radiacion de su cubierta de metal impedia que experimentara la influencia del frio de la lente, mas no bien se bajaba la cubierta, mediaba un cambio calorífico entre los dos cuerpos y perdiendo la pila más de lo que recibia, debia forzosamente bajar la temperatura de su cara destapada y producir así la corriente eléctrica que ocasionaba la desviacion de la aguja del reómetro. Para obviar este inconveniente, trasladé la lente detrás de la vidriera que daba á la galería, y puse una cortina de esterilla que se podia levantar fácilmente, con objeto de dar paso á los rayos lunares dentro de la habitacion, ó bajarla para interceptarlos. Tuve la cortina echada hasta que se restableció el equilibrio de temperatura, y despues de cerciorarme de que la aguja del reómetro no se desviaba cuando se bajaba la tapa de la pila, la cual seguia ocupando el foco de la lente, dí paso hasta el instrumento á la luz de la luna; al punto observé una desviacion de varios grados hácia la parte del calor. En seguida repetí el experimento y ví con gran sorpresa que la desviacion ocurria en sentido contrario.

»Bastóme reflexionar algunos momentos para convencerme de que estos cambios de direccion dimanaban, segun toda probabilidad, de las bocanadas de aire exterior que de vez en cuando entraban en la habitacion, llegando hasta la cara descubierta del cuerpo termoscópico. Fácilmente hubiera podido disponer las cosas de modo que el aire no tuviera acceso hasta la lente, pero, guiado por la teoría de la identidad (del calor y la luz), y por el conocido experimento de Saussure relativo al termómetro situado en el fondo de una caja de paredes de vidrio, creí conseguir mejor el objeto introduciendo en el tubo dos diafragmas de vidrio perfectamente diáfanos y lisos en sus cuatro caras, el primero á corta distancia de la pila y el segundo muy cerca de la abertura. Monté, pues, de esta manera los tubos de mi pila, y á la primera ocasion favorable, repetí el experimento. El índice del aparato se quedó al pronto estacionario algunos instantes; luégo empezó á desviarse poco á poco, y á los cuatro ó cinco minutos, se detuvo de un modo estable en un arco de 3°,7. Retiré la pila del foco y la puse á un lado, con la abertura vuelta siempre hácia el centro de la lente; al punto empezó á disminuir la desvia-

cion, y pocos minutos despues el índice volvió al cero. Reproduje muchas veces esta misma operacion, retirando la pila ora á uno, ora á otro lado, y la aguja se desvió siempre estando en el foco y volvió á cero fuera de él. Es inútil decir que la direccion de esta desviacion correspondia con la de la accion calorífica.

»El experimento era pues perfectamente claro y no dejaba el menor asomo de duda. Y en efecto, tuve ocasion de repetirlo más adelante en presencia de M. Belli, profesor de física en la universidad de Pavía, de MM. Mossotti y Lavagna, de la de Pisa y de otros muchos profesores distinguidos, todos los cuales salieron de



Fig. 135.— Melloni

mi gabinete plenamente convencidos de que la luz de la Luna es calorífica.

»Cuando pienso que los físicos que intentaron descubrir el calor lunar en el trascurso del siglo pasado se valieron, segun Lalande, de lentes de un metro y $1^{m},33$ de diámetro y del termoscopio sumamente sensible de Amontons, sospecho que los resultados negativos anunciados por dichos físicos dependian en gran parte del frio engendrado en sus lentes por la radiacion celeste unida al enfriamiento causado por las agitaciones del aire exterior al que estaban expuestos sus instrumentos: de suerte que no desconfio del todo de hacer el fenómeno ostensible con los termoscopios de dilatacion ordinaria.»

Los experimentos de Zantedeschi, Piazzi Smyth, lord Ross, y los más recientes de Marié-Davy y Baille, han confirmado los de Melloni. Zantedeschi (1848) concentraba los rayos lunares en una pila termo-eléctrica por medio de un espejo de 60 centímetros de diámetro y 19 de distancia focal. Piazzi Smyth efectuó sus observaciones en 1856 en la cumbre del Pico de Tenerife, recibiendo directamente los rayos lunares en la pila cuya cara estaba provista de un cono de metal bruñido; este físico compara el efecto obtenido al tercio del de una bujía situada á $4^{m},75$ de la pila. Lord Ross operó con un reflector de tres piés de abertura, deduciendo de sus resultados que la Luna radia como una superficie calentada á 360° Fahrenheit ó 182° centígrado.

En 1868, Marié-Davy empleó primero un termómetro diferencial de aire, graduado de manera que una de sus divisiones correspondiese á $0^{o},0043$, y concentró los rayos lunares en una

de las bolas con el auxilio de una lente de cerca de un metro de abertura, sin obtener efecto alguno apreciable. Reemplazando entónces el termómetro con una pila eléctrica de gran sensibilidad y la lente con la ecuatorial de 9 pulgadas del Observatorio de Paris, obtuvo las indicaciones siguientes:

Fechas	Edad de la Luna	Desviacion en grado
9 de octubre de 1869. .	4.° dia	0°,00017
10 — . .	5.° dia	0°,00013
12 — . .	7.° dia	0°,00075
12 — . .	id.	0°,00029
17 — . .	12.° dia	0°,00260
20 — . .	15.° dia	0°,00287

Como se ve, los efectos caloríficos iban creciendo con la edad de la Luna. La disminucion que marca la segunda observacion del 12 de octubre, consiste en que la Luna se hallaba á la sazon muy próxima á un horizonte brumoso. Para conocer el efecto directo de la radiacion lunar, hay que dividir los números de la tercera columna por 247, que es el poder de concentracion de la ecuatorial calculado para la hipótesis en que los 75 céntimos de la luz que daba en el objetivo llegasen hasta la pila. «La desviacion obtenida el 20, dice Marié-Davy, corresponderia entónces á 12 millonésimas de grado para los rayos luminosos directos de la Luna: es casi la sexagésima parte del resultado obtenido por Piazzi-Smyth en el pico de Tenerife, operando sobre la totalidad de los rayos lunares.»

Marié-Davy hace observar además, segun acabamos de decir, que el calor luminoso de la Luna crece rápidamente con su fase y añade que la altura del astro y el estado del cielo, áun sin nube alguna, influyen mucho en su intensidad. Cuida de distinguir entre el calor luminoso del astro que comprende todos los de los rayos solares que, despues de dar en la superficie de la Luna, son reflejados por ella, y el calor oscuro que se compone de dos clases de rayos oscuros; los que proceden de la radiacion solar y los que emanan directamente de la superficie caldeada del suelo de la Luna. Sábese en efecto que el calor oscuro es absorbido en proporcion mucho mayor que el luminoso, en su trayecto comun al través de las capas atmosféricas y de las lentes de vidrio del instrumento. Observando Piazzi Smyth en el Pico de Tenerife, es decir, á una altitud superior á las capas más absorbentes, y recibiendo directamente en su pila los rayos solares, evitaba estas dos causas de atenuacion, lo cual explica los efectos mucho más considerables obtenidos por dicho físico.

M. Baille ha comprobado una desviacion sensible, dimanada de la accion calorífica de la radiacion lunar, concentrando los rayos en el foco de un espejo cóncavo de 39 centímetros de abertura. Este físico calculó que para obtener la misma desviacion presentando delante de la pila un cubo de agua hirviendo de cara ennegrecida, habia que ponerlo á 34 ó 35 metros de distancia. De aquí dedujo que en Paris la Luna llena envia al suelo, durante los meses de verano, tanto calor como una superficie negra á 100°, del mismo tamaño aparente que el disco del astro y situada á 35 metros de distancia.

Así pues, los experimentos de Melloni, Smyth, lord Ross, Marié-Davy y Baille demuestran, sin ningun género de duda que en la superficie de la Tierra se siente la accion calorífica de la Luna.

No se sabe con exactitud cuál es la naturaleza de los materiales que componen el suelo lunar; pero cualquiera que sea, es probable que tenga alguna analogía con la de las rocas terrestres. No hay sin embargo que olvidar que la Luna no tiene atmósfera ó, si tiene alguna, que está extraordinariamente enrarecida; de todos modos, el cielo está allí siempre enteramente despejado, y por lo tanto la radiacion solar se efectúa en la Luna con gran intensidad. Aun suponiendo que el suelo lunar sea de gran poder difusivo, el absorbente debe producir en cada punto una elevacion de temperatura considerable, si se tiene en cuenta que los rayos del suelo le hieren sin interrupcion por espacio de 350 horas en cada intervalo de una lunacion. Sir John Herschell opinaba que esta temperatura era muy superior á la del agua hirviendo. Segun los cálculos de Harrison, llega á su máximum durante el cuarto menguante. Comparando Althaus la capacidad que tiene la Luna para el calor con la del cuarzo, estimaba aproximadamente su temperatura en 840° F, ó 449° centígrados, que es la defusion del zinc. Si el calor así acumulado, en razon de la naturaleza de sus radiaciones, apénas es perceptible en la superficie del suelo de la Tierra, falta saber si su absorcion por nuestra atmósfera es capaz de modificar el estado del tiempo; pero de esto nos ocuparemos

cuando estudiemos los fenómenos meteorológicos.

Para acabar de pasar revista á todos los manantiales de calor de orígen cósmico que ejercen ó pueden ejercer alguna influencia en el estado térmico de nuestro globo, podríamos hacer tambien mencion de los planetas, los cometas, los bólidos y las estrellas fugaces. La dificultad con que han tropezado los físicos para comprobar el efecto que producen los rayos caloríficos lunares, basta para que se comprenda cuán quimérico seria el tratar de averiguar la cantidad de calor extraordinariamente débil que reflejan hácia nosotros los discos planetarios, cuyas dimensiones son tan pequeñas y sus distancias á la Tierra tan grandes. Por lo que hace á los cometas, su luz parece producida en parte por una incandescencia propia de la materia de que están formados sus núcleos, y por consiguiente, en el caso de que su movimiento los trajese á muy corta distancia de nuestro globo, seria posible que se notara su proximidad en la temperatura de la Tierra; mas á pesar de cuanto se ha dicho de su influencia por este concepto, no se ha advertido aún ningun efecto sensible que pueda en rigor atribuirse á una accion calorífica especial. Las estrellas fugaces y los bólidos se hallan en diferente caso; son cuerpos que no se hacen visibles sino cuando penetran en nuestra atmósfera; á ello se debe sin duda su incandescencia, y únicamente en tal momento son para nosotros manantiales de calor. Es probable que en las grandes apariciones de estos meteoros, cuando en una misma noche cruzan á millares el espacio, esta brusca produccion de calor en las altas regiones del aire sea bastante intensa para modificar la temperatura atmosférica. Pero todavía no sabemos de ninguna observacion precisa sobre este punto de meteorología y de física celeste.

Por último, podríamos mencionar asimismo, como manantial propio para influir en la temperatura de la superficie del globo, el calor interior peculiar de este. Sábese que á cierta profundidad hay una capa cuya temperatura constante es poco más ó ménos la media del lugar. Debajo de esta capa la temperatura crece, siendo el promedio de su aumento de un grado por 30 metros. Si este aumento de calor, que se ha comprobado hasta más de 700 metros de profundidad, continúa en las capas más hondas en la misma proporcion, á 3 kilómetros se deberá encontrar ya la temperatura del agua hirviendo, y á 40 kilómetros la mayor parte de las materias minerales conocidas deberán llegar á su punto de fusion. Falta, sin embargo, saber si la enorme presion que soportan las capas terrestres, á partir de esta profundidad, no es un obstáculo para su liquefaccion, por lo cual la incandescencia del núcleo terrestre continúa en estado de hipótesis. Más adelante volveremos á tratar de este interesantísimo problema.

CAPITULO XV

LOS MANANTIALES DE CALOR

I

CALOR DESARROLLADO POR LAS COMBINACIONES QUÍMICAS.—LA COMBUSTION

El Sol es el manantial de calor más abundante y económico; pero no el más cómodo, puesto que no podemos disponer de él á nuestro antojo, y precisamente cuando el astro se oculta ó sus rayos son ménos fuertes es cuando más necesidad de calor tenemos; ni el más intenso, por cuanto á no concentrarlo mediante aparatos dispendiosos, sólo produce temperaturas relativamente débiles. Por lo tanto, se puede asegurar que la civilizacion hubiera sido imposible si el hombre sólo hubiese tenido á su disposicion el calor solar, y no hubiera encontrado en lo que se llama manantiales artificiales de calor con qué atender á las necesidades más indispensables de su existencia. La combustion viva, es decir, la combinacion química de ciertos cuerpos con el oxígeno, es lo que principalmente constituye esta clase de manantiales, procediendo el nombre de manantiales ó focos artificiales de que el hombre puede utilizarlos á su

albedrío y regular su intensidad segun las necesidades del momento.

. . . .

Por lo general, siempre que dos cuerpos se combinan, se desprende calor. Por ejemplo, una mezcla de agua y de ácido sulfúrico, ó de agua y cierta cantidad de cal viva va acompañada de una elevacion de temperatura bastante grande, aunque no lo suficiente para producir luz. Por lo comun es la combinacion del oxígeno, uno de los gases constitutivos del aire, con ciertos cuerpos simples, la que, motivando un intenso desprendimiento de calor acompañado de luz, da lugar al fenómeno de la combustion viva. Mas para que un cuerpo combustible pueda arder, ya al aire libre, ya en el oxígeno puro, es preciso comunicar á uno de sus puntos una temperatura elevada; en otros términos, es preciso encenderlo. Comenzada ya la combustion, el calor que desprende se comunica cada vez más hasta que se consume del todo el gas comburente, ó hasta que el cuerpo con el cual se combina se ha consumido á su vez enteramente. Así es cómo obtenemos la lumbre de nuestros hogares, la luz de nuestras bujías y lámparas; y sabemos por experiencia que estos manantiales de luz y calor sólo duran miéntras se les alimenta, esto es, miéntras se les proporciona los dos elementos de la combustion.

Fácil es comprobar el cometido del oxígeno en la combustion al aire libre, mediante experimentos que cualquiera puede hacer. Si se llena de agua un plato en el cual descanse una bujía encendida, y se cubre esta con una campana ó fanal cuyos bordes penetren en el líquido, al punto se observa una disminucion de brillo en la llama, que acaba por apagarse. Lo que prueba que esta disminucion de brillo y la extincion consiguiente consisten en la desaparicion progresiva del oxígeno contenido en la campana, es que el nivel del agua se eleva dentro de esta sobre el de la del plato, por efecto del exceso de presion del aire exterior sobre el aire privado de una parte de su oxígeno. Nótase el mismo fenómeno si debajo del recipiente de la máquina neumática se pone la bujía encendida, ó cualquier otro cuerpo en ignicion, como brasas de carbon; pues á medida que se hace el vacío, disminuye la intensidad de la llama, palidece y acaba por apagarse; y las brasas se ennegrecen y se apagan tambien. En cambio se aviva la combustion cuando se renueva el aire puesto en contacto con un cuerpo en ignicion, lo cual se hace soplando con un fuelle en su superficie, ó activando el tiraje en la chimenea ó el hornillo que lo contiene.

Así pues, cuando la combustion ocurre en el oxígeno puro, es mucho más viva que al aire libre, y una bujía, una cerilla apagadas, se encienden de nuevo y arden con vivacidad, con tal que haya quedado en ellas la menor partícula incandescente, si se las introduce en una probeta llena de dicho gas. Metiendo en una campana de vidrio llena de oxígeno un alambre de acero en espiral que lleve un pedazo de yesca inflamado (fig. 136), resulta una incandescencia muy viva del metal, que despide multitud de chispas en todos sentidos. El calor desprendido en esta combinacion de hierro y oxígeno es tan intenso, que las partículas incandescentes de óxido de hierro que resultan y que saltan como acabamos de decir, se incrustan en las paredes de la vasija de vidrio. Si recordamos que la temperatura de fusion del vidrio sólo es de 700° á 800°, al paso que la del acero está comprendida entre 1300° y 1400°, no nos causará extrañeza esta circunstancia.

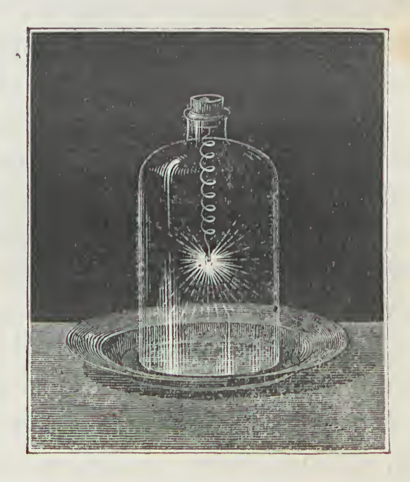


Fig. 136.—Combustion del hierro en el oxígeno

El fenómeno de la combustion es complejo, y el aspecto así como la composicion de las diferentes partes de un gas en ignicion, ó lo que es lo mismo, de una *llama*, varían segun la naturaleza del gas: la llama puede ser más ó ménos luminosa en sus distintas partes y de color vario. Hé aquí algunos detalles interesantes

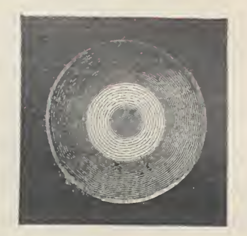
acerca de este asunto, tomados de un artículo del *Diccionario de química* de Wurtz:

«El eje de la llama se compone casi exclusivamente de gas que no arde y frio. Alrededor de este eje hay zonas concéntricas que contienen cantidades cada vez mayores de gas exterior, el cual es frio tambien; y por consiguiente, la temperatura de las capas intermedias varía de modo que presenta un máximum. ¿Varía con regularidad? En la llama de los gases simples es verosímil, pero en la de los gases ó vapores complejos varía dando saltos más ó ménos bruscos.....

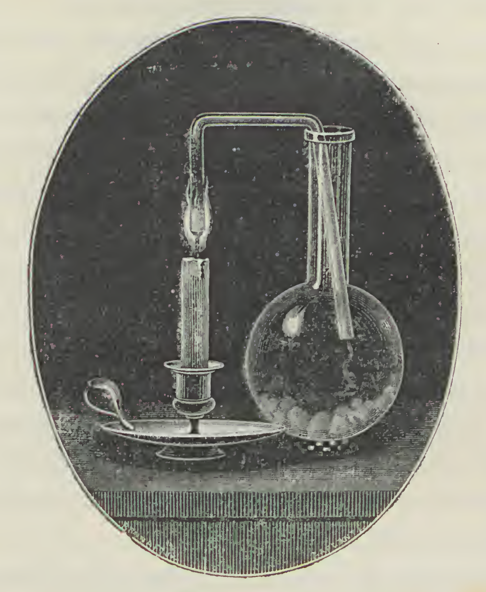
»Tomemos como ejemplo la llama de una bujía (fig. 137). El vapor de ácido esteárico ocupa el centro oscuro de la llama C; la temperatura es poco elevada, porque todo el calor suministrado por la envolvente incandescente lo absorbe la volatilizacion del combustible, pudiendo meterse en ella un grano de pólvora sin que se prenda fuego. Alrededor de este núcleo frio y no luminoso la combustion ocasiona una elevacion de temperatura extraordinaria; el ácido esteárico sufre entónces las trasformaciones pirogenadas por que pasaria en un tubo calentado al rojo blanco, fórmase una serie de carburos muy condensados y muy poco hidrogenados hasta el mismo carbono; y al propio tiempo se produce hidrógeno y varios gases, entre los cuales se puede notar fácilmente el acetileno. Todos estos productos transitorios llegan en breve á las zonas en que el oxígeno del aire penetra más y más abundantemente, arden en parte formando óxido de carbono, ácido carbónico y agua, y se resuelven parcialmente en carbono é hidrógeno, los cuales se queman á su vez. El carbono llega á la incandescencia en el momento de su separacion A, y produce una luz muy viva, y el hidrógeno rodea la llama luminosa de una capa B casi oscura, pero sumamente caliente. Frankland ha demostrado que no es necesaria la presencia del carbon incandescente en la zona luminosa para explicar su brillo; pero el depósito de negro de humo que se forma en la superficie de los objetos introducidos en ella, y el estudio de todas las reacciones pirogenadas, parecen probar hasta la evidencia la separacion real del carbon en esta parte de la llama. Por otra parte, si en la llama poco luminosa del alcohol se hace penetrar un gas capaz de dar oxígeno á un depósito de carbon, por ejemplo un poco de cloro, este se vuelve instantáneamente lumínico. Fácilmente se distinguen las diferentes capas de que acabamos de hablar en la llama de una bujía, para lo cual basta atravesar por su parte media una tela metálica. En la base de la llama hay un casquete de color azul puro D, que no hemos tenido en cuenta; y que corresponde á la reaccion de un exceso de aire puro sobre el gas hidrocarbonado. El análisis espectral da á conocer en él la presencia del vapor de carbono.



Fig. 137. — Estructura de la llama de una bujía


Fig. 138. — Seccion de la llama de una bujía

»Faraday ha ideado un bonito experimento para demostrar la presencia de los gases incombustibles en el núcleo oscuro de la llama de una bujía. Introdúcese en esta llama el extremo de un tubo doblado como se ve en la figura 139, de un diámetro interior de 7 milímetros próximamente y lo suficientemente delgado para que el calor no lo rompa; por este tubo se elevan varias sustancias que se volatilizan, se enfrian


Fig. 139.—Experimento de Faraday

en el brazo descendente y caen en la redoma en forma de corrientes de humos muy densos, blancos é inflamables si el orificio del tubo está á algunos milímetros de la torcida. Si este orificio está metido en la parte lumínica, son negros, no inflamables y mezclados con carbon; y si en contacto con la torcida, casi únicamente formados de ácido esteárico.»

En virtud de este análisis de las diferentes partes que componen una llama compleja, como la de una bujía, se ve que la temperatura, consecuencia de la mayor ó menor actividad de la combustion, debe variar considerablemente segun la zona que se considera. C. Murray ha podido introducir en el centro del núcleo oscuro una cucharilla de marfil con unos cuantos granos de pólvora sin que estos se inflamasen; el fósforo se apaga en él; y por el contrario, en B, en esa envolvente casi oscura que rodea exteriormente la llama, la temperatura es muy elevada. Para explorar la llama se puede hacer uso de un alambre de platino muy fino, y se ve que queda oscuro en el centro miéntras que se enrojece en las regiones más calientes, siendo el brillo más ó ménos vivo de su incandescencia la medida relativa de la temperatura del punto en que el alambre está metido.

Si se sopla con fuerza la llama de una bujía, nadie ignora que se apaga: la razon de esto es muy sencilla; con el soplo se introduce aire frio en el gas inflamable, el cual se enfria además al difundirse por una masa de aire mayor, y la temperatura baja bastante para que la combustion cese. Si, despues de haber soplado bruscamente la llama, la torcida continúa incandescente, se la vuelve á encender soplando ligeramente en ella, lo cual se comprende tambien, por cuanto así se renueva el oxígeno necesario para la combustion, el gas se desprende de nuevo y se inflama al contacto de las partes sólidas incandescentes.

Volvamos al fenómeno general de la combustion.

Dícese comunmente que el oxígeno es el cuerpo ó el elemento *comburente*, al paso que la otra sustancia, aquella con la cual se combina desprendiendo luz y calor, como carbon, gas de la hulla, estearina, etc., se llama por oposicion elemento *combustible*, pero es evidente que esta distincion no significa nada desde el punto de vista químico. Segun observa M. G. Salet, «se puede decir tambien que el oxígeno *arde* en el hidrógeno, cuando se hace pasar aquel gas á un tubo lleno de hidrógeno inflamándolo á su entrada en él.»

Aparte de esto, el oxígeno no es el único cuerpo que desempeña el papel ántes descrito. Tomemos un frasco lleno del gas verdoso que constituye el cloro, y metamos en su interior

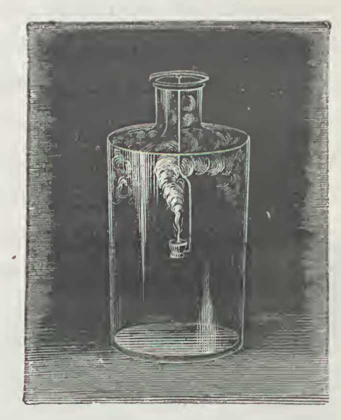


Fig. 140.—Combustion del fósforo en el cloro

un fragmento de fósforo colocado en una capsulita sostenida por un alambre. El fósforo se inflama y despide una humareda blanca que es el cloruro de fósforo resultante de la combinacion; siendo muy elevada la temperatura á que ocurre esta combinacion. Si se mete una cerilla fosfórica encendida en un frasco que contenga una mezcla de gas hidrógeno y cloro, sobrevendrá una explosion. Por último, el arsénico y el antimonio reducidos á polvo arden si se les echa en un frasco lleno de cloro. Así pues, tan luégo como se ponen en accion las afinidades poderosas de este gas para con ciertos cuerpos, resulta combustion, es decir, desprendimiento de gas y de calor enteramente igual al que resulta de la combustion ordinaria por la accion del oxígeno.

En general, para que haya combustion es preciso que los elementos comburente y combustible estén á cierta temperatura, ó lo que es lo mismo, que se les acerque un cuerpo que tenga á su vez la temperatura de la inflamacion. Pero, apénas ha empezado esta, el calor desprendido suele bastar para elevar las partes contiguas á esta misma temperatura, y la combustion se propaga. La posibilidad de esta propagacion, la rapidez, la mayor ó menor energía con que se efectúa dependen de una serie de

condiciones, las principales de las cuales son: el poder conductor del cuerpo combustible, su calor específico, su masa, su forma, la presion del medio ambiente, etc. Por ejemplo, un alambre delgado de magnesio arde de una punta á otra al aire libre, y se apaga con tanta mayor rapidez cuanto más grueso es su diámetro. La antracita es una especie de hulla que arde con dificultad; sus fragmentos se apagan en cuanto quedan aislados.

Davy, y luégo Frankland, han estudiado la influencia de la presion en la combustion. El primero comprimió aire hasta reducir á la quinta parte su volúmen, y calentó en él al rojo blanco un alambre por medio de la electricidad; el brillo de la combustion no fué mayor que en el aire ordinario; sin embargo un volúmen de la mezcla contenia tanto oxígeno como habia en un volúmen igual de oxígeno puro á la presion ordinaria. Frankland y Davy han visto que el calor despedido en un tiempo determinado por un cuerpo en combustion, una bujía por ejemplo, es independiente de la presion; lo cual dimanaba de la circunstancia de que la bujía se consumia con la misma rapidez, cualquiera que fuese la presion del aire; pero el primero de dichos físicos, en oposicion al resultado obtenido por el segundo, reconoció que el brillo disminuia con la presion. Tyndall refiere en los términos siguientes una observacion hecha por Frankland en 1859 y que demuestra la influencia que la presion ejerce en la combustion: «Se compraron seis bujías en Chamounix y se las pesó cuidadosamente; ardieron una hora en la fonda de la Union y se averiguó la pérdida de peso que habian experimentado. Lleváronse estas mismas bujías á la cima del monte Blanco, y en la mañana del 21 de agosto se las hizo arder por espacio de una hora en una tienda donde estaban perfectamente resguardadas de la influencia del viento. El aspecto de las seis llamas que daban á tan grande altura nos sorprendió: parecian un reflejo mortecino de las llamas que las mismas bujías daban en el valle de Chamounix: pálidas, pequeñas, débiles, revelaban una energía de combustion considerablemente amortiguada. Pesamos cuidadosamente las bujías á nuestro regreso, y vimos con asombro que la cantidad de estearina consumida en lo alto del monte era casi la misma que la consumida en la fonda, y por consiguiente, aunque el poder lumínico de la llama hubiera disminuido en proporcion extraordinaria, la energía de la combustion habia sido la misma.»

II

PRODUCCION DE LAS ALTAS TEMPERATURAS

La combustion es tanto más activa y la temperatura obtenida tanto más elevada cuanto mayor la cantidad de oxígeno suministrada al combustible en un tiempo determinado. Largo tiempo há que se conoce esta circunstancia, averiguada por la práctica industrial mucho ántes de analizar el fenómeno desde el doble punto de vista físico y químico. De aquí ha resultado el empleo de esas poderosas máquinas insuflantes de los altos hornos y de las fraguas, así como el del soplete de los laboratorios. Entremos en algunos detalles acerca de este último aparato, que tantos servicios presta á los plateros y esmaltadores, á los físicos, químicos y mineralogistas.

La figura 141 representa la forma que se da hoy al soplete, aparato cuyo inventor es tan desconocido como antiguo, y que los mineralogistas suecos del pasado siglo introdujeron en los laboratorios. Es un tubo ligeramente cónico, con una boquilla *b* en su extremo más ancho y una cámara de aire *a*; está doblado en ángulo recto y termina en una punta agujereada de platino *o*. Cuando se sopla en el tubo con la boca, contrayendo los músculos de las mejillas para evitar el cansancio que resultaria de la presion ejercida por los músculos del pecho, el aire sale con fuerza y de un modo continuo por la pequeña abertura *o*, y si se dirige la corriente á la llama de una bujía, ó á la de una lámpara de aceite ó de alcohol, esta forma un chorro á modo de dardo, como se ve en las figuras 142 y 143. Los esmaltadores se sirven de un fuelle de aire continuo para ali-



Fig. 141.—Soplete

mentar la corriente. Dase el nombre de *lámpara de esmaltador* al aparato así constituido y que se usa para trabajar el vidrio.

Enrique Sainte-Claire Deville se ha valido del hornillo representado en la fig. 144 para obtener temperaturas capaces de fundir cromo, sílice y platino. En una cavidad hemisférica de hierro F descansa una parrilla ó disco de hierro

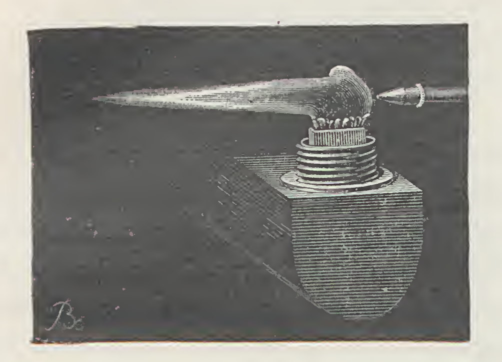


Fig. 142.—Soplete : produccion de una llama oxidante

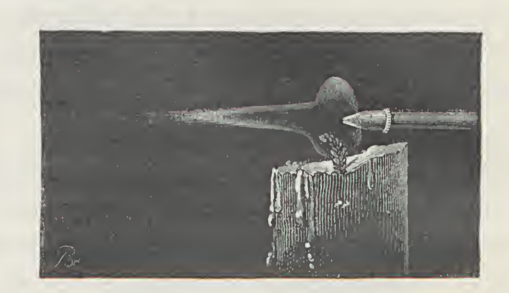


Fig. 143.—Llama reductora

lleno de agujeros, y un cilindro de tierra refractaria de unos 12 centímetros de diámetro interior. En el centro de la parrilla se pone un crisol de cal no hidráulica A, de paredes gruesas, que contiene interiormente otro crisol lleno de la materia que se ha de fundir (por ejemplo óxido de cromo mezclado con carbon de azúcar). Se le calienta primero con carbon vegetal, y cuando los dos crisoles se hán puesto al rojo, se llena el hornillo de fragmentos de hulla bien limpios, y se activa la combustion con un soplete de fragua, cuya abertura se ve á la derecha del dibujo. Al cabo de una hora de caldeo, la materia queda completamente fundida, si no es más refractaria que el cuarzo ó el platino.

El mismo sabio físico, en colaboracion con M. H. Debray, ha hecho importantes trabajos acerca de la produccion de altas temperaturas y que tenian por objeto la fusion de masas considerables de metales refractarios, como el platino. Con este fin, han utilizado la combustion del hidrógeno en el oxígeno (1), é ideado un

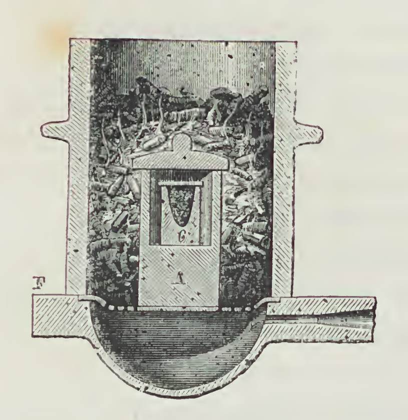


Fig. 144.—Hornillo de laboratorio de H. Sainte-Claire Deville.

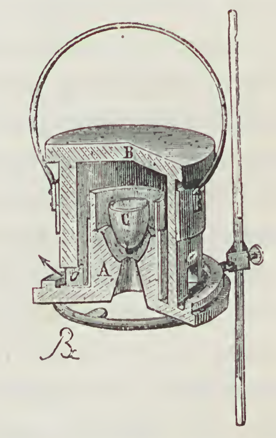


Fig. 145.—Hornillo Fourquignon y Leclercq

aparato cuya descripcion y figura son las siguientes:

«El aparato que va á servirnos para fundir y colar el platino, á vuestra presencia, como un metal cualquiera, se compone de dos partes distintas: el soplete, para producir el calor necesario para la operacion, y el hornillo ó crisol que debe contener el metal sometido á la fusion.

»El soplete consiste en un cilindro de cobre EEE'E' (fig. 146), de 12 milímetros de diámetro, terminado en su parte inferior en una pieza de platino ligeramente cónica. Un tubo de cobre CC de 3 á 4 milímetros de diámetro interior y terminado en una pieza de platino

(1) En otro tiempo se estimaba en 6000 y hasta en 8000° la temperatura de combinacion de estos dos gases; pero despues del descubrimiento de los fenómenos de disociacion hecho por Sainte-Claire Deville, este físico reconoció que debia rebajarse mucho dicha temperatura, y la fijó, con Debray, en unos 2500°. Por otra parte, combinando Bunsen entrambos gases en un udiómetro muy resistente, y midiendo la presion máxima que de esta combinacion resultaba, vino á deducir la cifra de 2800°, que se diferencia muy poco de la anterior.

atornillada á él, penetra en el primer cilindro por su parte superior, quedando sujeto á este por un tornillo de presion P, que cuando se desatornilla, permite dar á la punta de platino la altura que se desea, con relacion al extremo inferior del cilindro EEE′E′.

»Este cilindro lleva lateralmente un tubo bastante ancho, al cual hay adaptada una llave

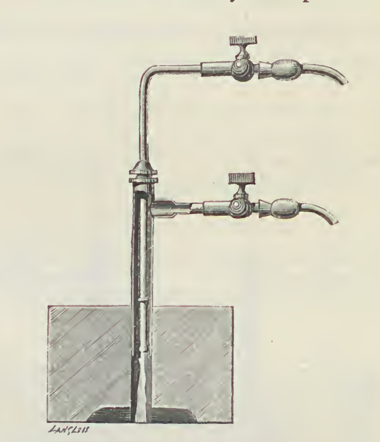


Fig. 146.—Soplete de gas oxihídrico

H de gran seccion. Otra llave O termina asimismo el extremo acodado del tubo C. Por la primera llave y por medio de un tubo de goma, se hará llegar el gas del alumbrado que sirve de combustible; por la segunda se introducirá el oxígeno que ha de quemarse. El extremo inferior del tubo por el que se introduce el oxígeno tiene un agujero cuyo diámetro varía de 2 á 3 milímetros, segun las dimensiones del hornillo que se quiera emplear.

»Este hornillo se divide en dos partes: 1.º La bóveda AA formada de un pedazo de cal al que se le ha dado la forma cilíndrica en un torno y excavado ligeramente en su parte inferior: en su eje lleva además un agujero un tanto cónico por el cual penetra el soplete, y tiene lateralmente una ranura poco profunda. 2.º De un zócalo ahuecado en otro pedazo de cal tambien cilíndrico: la cavidad es un casquete esférico cuya altura es poco más ó ménos la de los dos tercios del radio del círculo de base. En el borde de este casquete se hace con un raspador una ranura inclinada hácia dentro, que corresponderá con la de la bóveda. Los productos de la combustion se escaparán por la abertura que forman con su reunion, y asimismo se introducirá por ella el metal para fundirlo y colarlo. Finalmente, para impedir que el aparato se rompa durante la operacion, la bóveda y el hornillo están rodeados de alambres de hierro muy juntos y apretados que mantendrán unidas las diferentes partes del aparato, si el fuego llegase á grietearlas.

»Para hacer una fusion, se empieza por ajustar la bóveda al hornillo de modo que las ranuras se correspondan, y en seguida, teniendo el soplete en la mano, se abre la llave H para dar entrada á una escasa cantidad de gas combustible al que se prende fuego: ábrese tambien la llave O de modo que penetre la cantidad de oxígeno necesaria para quemarlo. Entónces se hace que la llama entre en el agujero de la bóveda y se aplica allí la punta del soplete. Se calientan poco á poco las paredes del horno, aumentando gradualmente la velocidad del gas, hasta llegar al máximum de temperatura; con una hoja de platino que se introduce por la abertura lateral hasta el chorro de gas, se juzga muy pronto del punto en que el calor es más vivo ó en que la fusion se hace mejor. Bajando ó levantando segun sea menester el orificio del tubo que da paso al oxígeno, se consigue calen-

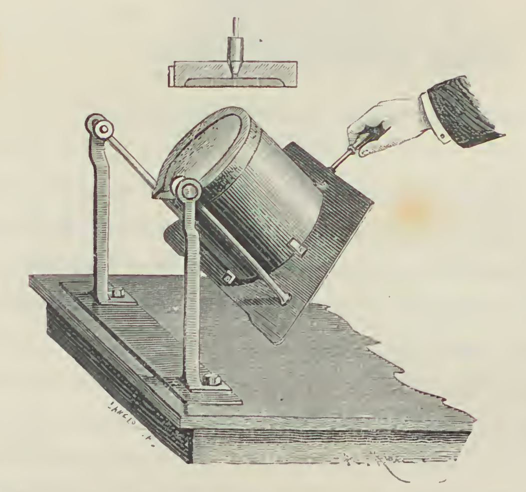


Fig. 147.—Procedimiento para colar el platino en fusion

tar el fondo del hornillo lo bastante para que el platino se funda en él, dejando el máximum de calor un poco más arriba. Se sujeta entónces el tornillo y se introduce poco á poco el platino por la abertura lateral. Si el platino está en láminas delgadas de un milímetro de grueso, apénas hay tiempo de introducirlas, pues se las ve desaparecer no bien entran en el hornillo. El oxígeno debe llegar con cierta presion, unos 4 ó 5 centímetros de mercurio, y entónces puede imprimir al platino fundido un movimiento giratorio que regulariza la temperatura en

toda su masa, y que facilita al propio tiempo su afinacion.»

Operando así, Debray y H. Sainte-Claire Deville empleaban 60 litros de oxígeno y 120 de hidrógeno para fundir un kilógramo de platino y mantenerlo en estado de fusion miéntras duraba la afinacion. «Así es que el precio de coste de semejante fusion es sumamente reducido, y segun nuestros cálculos, no excederia, haciendo una operacion diaria, de 20 ó 30 céntimos por kilógramo, es decir, la milésima parte de lo que hoy cuesta la revivificacion del metal por los procedimientos de la vía humeda (1).»

Cuando se trata de fundir masas algo considerables, se acopla en el mismo hornillo un número mayor ó menor de sopletes alimentados por el gas oxihídrico. La figura 149 representa un gran crisol como el que sirvió en 1874 para fundir 250 kilógramos de platino iridiado. Esta operacion, la más importante de todas las de

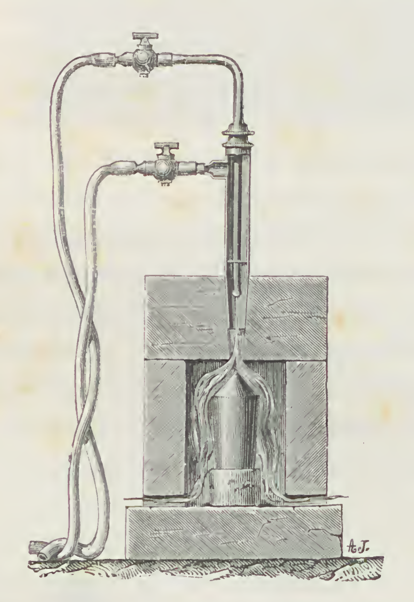


Fig. 148.—Fusion del platino: hornillo y soplete oxihídrico de H. Sainte-Claire Deville

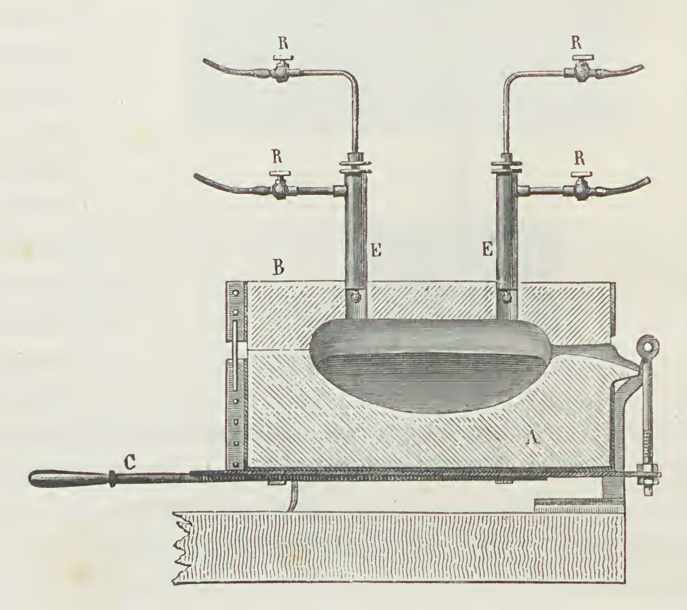


Fig. 149.—Crisol de sopletes acoplados para la fusion del platino

este género intentadas hasta entónces, tenia por objeto obtener de una misma fundicion un lingote de una aleacion de 30 por 100 de platino, y 10 por 100 de iridio, de modo que se diera una homogeneidad completa á toda la masa. De dicho lingote, compuesto de 225 kilógramos de platino y 25 de iridio, habian de salir todos los nuevos patrones métricos, metros y kilógramos, que la Comision internacional del metro estaba encargada de construir para los diferentes países que adoptan el admirable sistema de medidas que la Convencion nacional sustituyó, há más de un siglo, á las antiguas medidas francesas. Efectuóse la operacion en el Conservatorio de Artes y Oficios, habiéndola dirigido G. Tresca y Matthey de Lóndres, y comprobado Sainte-Claire Deville y Debray. Fundióse primeramente una serie de veinte lingotes pequeños, cada uno de 10 á 15 kilogramos, con un solo soplete. La cantidad conveniente de iridio pulverizado en gránulos se habia introducido al mismo tiempo que el platino, cortado en placas delgadas y encorvadas á modo de canal. De la aleacion así obtenida se hizo una segunda fusion en tres veces, en lingotes de unos 83 kilógramos cada uno, lo cual exigió el empleo simultáneo de tres sopletes. Como quiera que el análisis de la aleacion, hecho por Debray, indicara un ligero exceso de iridio, se la redujo á las propiedades apetecidas agregándole 5 kilógramos de platino puro, en la tercera y cuarta operaciones. En un crisol de grandes dimensiones, de piedra caliza tosca, se echaron los pedazos de platino iridiado procedentes de los tres lingotes de la segunda fusion, y empezó el caldeo, el cual se

(1) Fácilmente se comprenderá la importancia de los nuevos procedimientos de fusion del platino, cuando se sepa que el procedente de las vasijas de química retiradas de todo servicio no tenia ántes más valor que el mineral mismo. La depreciacion que resultaba era tal, que una de esas vasijas que sirven para la concentracion del ácido sulfúrico, y cuyo precio asciende á 80,000 francos cuando nuevas, se vendia por 50 ó 60,000 al desecharlas, lo cual sucede con bastante frecuencia. Por desgracia el platino es bastante caro á causa de la escasez de su mineral. El precio del kilógramo es de 900 á 1000 francos.

hizo con siete sopletes, que penetraban por otros tantos orificios al través de la tapadera del crisol. El gas oxígeno y el gas hidrógeno (gas del alumbrado) llegaban separadamente á dos esferas de cobre, cada una provista de siete llaves de las cuales partian los tubos de goma que alimentaban los sopletes. La primera carga de 110 kilógramos quedó fundida en 43 minutos: al cabo de otros 35 minutos, habia terminado la fusion total de los 250 kilógramos, que consumió 31 metros cúbicos de oxígeno y 24 de gas del alumbrado, ó sean 124 litros del primero y 96 del segundo por kilógramo de platino iridiado fundido. Segun lo hizo observar Tresca, este consumo está enteramente conforme con lo previsto por Deville y Debray.

El lingote obtenido en tan memorable operacion formaba una barra de $1^{m},140$ de longitud, 178 milímetros de anchura y 80 de grueso. El metal, visto cuando se hallaba en plena fusion en el crisol, tenia un color blanco de plata deslumbrador, era flúido como mercurio y su superficie tan reflejante como la de este líquido.

Las altas temperaturas de que acabamos de hablar son resultado del desprendimiento de calor que ocurre en una combinacion química, y en este caso particular es la del oxígeno con otro gas combustible, el hidrógeno. En la combustion al aire libre, se da más energía á la accion y mayor intensidad al calor aumentando la velocidad con que las corrientes gaseosas se precipitan una sobre otra. Pero la presencia en el aire de un gas inerte, el nitrógeno ó ázoe, es un obstáculo para la energía de la combinacion química y para el desarrollo del calor que es su consecuencia; obstáculo que no se puede evitar sino poniendo oxígeno puro en contacto directo con el hidrógeno, como en los aparatos de Enrique Sainte-Claire Deville.

Al describir el arco voltáico hemos hecho mencion de los experimentos que prueban cuán poderoso es este manantial luminoso y calorífico; y en efecto, recordemos que las sustancias más refractarias se funden y volatilizan en él. El célebre electricista Siemens de Lóndres ha utilizado recientemente dicho arco para fundir pedazos de acero puestos en un crisol de grafito, empalmado con el polo positivo de dos máquinas dinamo-eléctricas asociadas *en cantidad.* La tapadera del crisol tenia un agujero por el cual pasaba un cilindro de carbon que formaba el polo negativo: otras disposiciones especiales mantenian en límites convenientes la resistencia eléctrica del crisol, y servian para regular la distancia de los polos entre los cuales se producia el arco. A los cuatro minutos y medio se pudo fundir un kilógramo de acero por este método, que es probablemente más costoso que la fusion directa. Si hacemos mérito de este medio de producir una temperatura elevada es tan sólo para demostrar que tambien son las combinaciones químicas las que determinan en él el calor necesario para la fusion. En efecto, la corriente eléctrica que engendra el arco voltáico es producto del movimiento de una máquina que saca á su vez su potencia del vapor, y este se obtiene merced á la combustion de cierta cantidad de ulla, es decir, mediante una combinacion química.

III

CALOR PRODUCIDO POR LOS SÉRES VIVIENTES.—CALOR ANIMAL

Los séres organizados, lo propio que los inorgánicos, están sujetos á las leyes que rigen los cambios de calor por radiacion ó por conductibilidad, y no tendríamos nada que añadir á lo que hemos dicho acerca de este punto, si miéntras dura toda su *vida*, no gozasen además de la facultad de *producir calor*, si no fuesen tambien manantiales de un calor que les es propio y que les permite mantenerse fuera del equilibrio de temperatura con el medio líquido ó gaseoso en cuyo seno moran. «En las condiciones *normales* de su desarrollo y de su existencia, dice M. Gavarret, los séres organizados tienen y conservan una temperatura superior á la del medio ambiente; la observacion más vulgar lo muestra así en cuanto á las aves y los mamíferos. Es necesario apelar á medios de investigacion más delicados, y sobre todo preservarse con cuidado de la accion frigorífica de la *evaporacion* para comprobar la exactitud de este aserto en el resto del reino animal y en toda la extension del vegetal; pero el hecho no es ménos general y hoy por hoy incontestable. Cuando, *por excepcion*, la temperatura que ro-

dea á los séres vivientes pasa de 40° á 45°, resisten este calor y se mantienen bajo la temperatura exterior, con tal sin embargo que la influencia no sea ni muy intensa ni muy prolongada para comprometer definitivamente su existencia.»

Para medir la temperatura de los séres vivientes en las diferentes partes de su organismo, así como para estudiar sus variaciones, los observadores se han valido de los aparatos termométricos más sensibles, como termómetros metastáticos de mercurio, pilas termo-eléctricas, agujas y discos termo-eléctricos. Ya dejamos descritos estos instrumentos; vamos ahora á decir los resultados obtenidos, empezando por los que se refieren á la temperatura de los animales.

Se les puede dividir por este concepto en dos grupos principales: el primero comprende las aves, que son los séres organizados de temperatura más elevada, y los mamíferos, en cuyo número hay que distinguir al hombre: en el segundo grupo se reunen todos los demás animales, reptiles, peces, insectos, moluscos, etc., es decir toda la parte inferior de la escala animal. Por espacio de mucho tiempo se ha distinguido entre sí á los séres de estos dos grandes grupos, dando á los primeros el nombre de *animales de sangre caliente* por oposicion al de *animales de sangre fria* que caracterizaba á los otros, pues se creia que tan sólo los primeros poseian una temperatura propia, y que la de los otros se confundia con la del medio ambiente. Aún no se habia logrado averiguar la diferencia, escasa en verdad, pero de ningun modo nula, que existe entre las dos temperaturas interior y exterior. Pero hoy no cabe dudar que entre los animales de los dos grupos sólo hay diferencia de grado, y por consiguiente se deben desechar las anteriores denominaciones.

Las investigaciones de un gran número de observadores, entre ellos Martine, Hunter y Davy en el siglo pasado y Despretz, Prevost y Dumas, en el presente, han probado que á la edad adulta y con una alimentacion normal, la temperatura de las aves, medida en el recto, oscila entre 39°,5 y 44°. Despretz ha visto que era de 39°,8 en los gorriones, y de 42°,98 en las palomas; Pallas ha averiguado que era de 44°,03 en varias avecillas. De un cuadro que comprende la temperatura de un gran número de mamíferos, resulta 35°,5 para el mono, 40° para el conejo, el carnero, la cabra y el manatí. Pero en un mismo individuo la temperatura puede variar en más de un grado centígrado, segun las circunstancias.

Naturalmente, la temperatura del cuerpo humano ha sido objeto de un gran número de observaciones: recordándolas M. Gavarret en su obra, deduce que, en estado fisiológico ó normal, la temperatura del hombre adulto, tomada en el sobaco, puede oscilar en nuestros climas templados entre 36°,5 y 37°,5.

Cuando se habla de la temperatura de un animal conviene precisar bien en qué sitio se ha tomado, por cuanto varía segun cuál sea la parte del cuerpo explorada. M. Becquerel ha empleado para estas investigaciones las agujas termo-eléctricas, que tienen la ventaja de poderlas introducir en los tejidos sin desgarrarlos ni desorganizarlos, ó en los vasos sanguíneos sin producir ninguna perturbacion apreciable en la circulacion. De esta suerte ha reconocido que la temperatura de la sangre, arterial ó venosa, va creciendo á medida que se la examina más cerca del corazon. «Así es que en la carótida, la temperatura de la sangre es 0°,15 mayor que la de la sangre de la arteria crural; la temperatura de la sangre de la vena yugular difiere en + 0°,30 de la de la vena crural.» Pero «la temperatura de la sangre arterial es siempre muy superior á la de la sangre venosa cuando se hace el experimento en puntos correspondientes de los vasos colaterales. Así, en el nacimiento de la aorta, la sangre tiene 0°,84 más que la de la vena cava superior en el punto en que este vaso llega á la aurícula derecha; la temperatura de la sangre de la arteria crural es 0°,98 mayor que la de la vena del mismo nombre.» Por último, «la temperatura de los músculos predomina en gran manera sobre la del tejido celular que los rodea.»

Hay además muchas causas que hacen oscilar la temperatura media del cuerpo de los animales, aunque á decir verdad entre reducidos límites; la edad, el sexo, el estado de vigilia ó de sueño, de reposo ó de actividad, de salud ó de enfermedad, las estaciones, los climas, son otras tantas causas de variacion que nos limita-

mos á indicar, porque el estudio detallado de estos elementos del calor animal es más bien de incumbencia de la fisiología que de la física. Hay sin embargo un rasgo característico que conviene tener presente; y es que la temperatura del cuerpo de los mamíferos y aves es sensiblemente independiente de las variaciones de la del medio ambiente. La influencia de la estacion, del clima, no es bastante grande para contrarestar este resultado general, puesto fuera de duda por numerosas observaciones. Los relatos de los viajeros á las regiones polares demuestran que el hombre puede vivir en una atmósfera á 70° bajo cero sin que la temperatura de su cuerpo sufra cambios notables. Por lo que atañe á los animales, Gavarret cita «los resultados obtenidos por los capitanes Parry y Back en sus viajes al polo Norte: el primero vió un raposo que conservaba una temperatura superior en 76°,7 á la del medio ambiente, y el segundo un lagópedo de los sauces cuya temperatura era 79°,1 mayor que la de la atmósfera. Estos casos son á no dudarlo suficientes para autorizarnos á considerar á los mamíferos y á las aves, como animales de *temperatura fisiológicamente constante.*»

Otras y no ménos numerosas observaciones prueban que los animales superiores pueden soportar impunemente temperaturas excesivas, es decir, que pasen con mucho de 40 á 45° centígrados. El cuerpo humano goza de la misma facultad. Desde el caso comunicado en 1763 por Tillet á la Academia de Ciencias, y relativo á tres muchachas que servian en el horno de Larochefoucault, las cuales podian permanecer *cinco* y hasta *diez* minutos dentro de dicho horno por caliente que estuviese, soportando así sin consecuencia una temperatura de 132° centígrados lo ménos, se han hecho continuos experimentos del mismo género con el hombre y con los animales. La facultad de resistir temperaturas muy altas sin que la propia del cuerpo se eleve de un modo sensible es, pues, incontestable. La resistencia al enfriamiento se hace posible por la sobreexcitacion de las causas que producen el calor, al paso que la resistencia á las causas exteriores de caldeo procede de la traspiracion abundante, de la evaporacion y del frio que esta origina en la superficie del cuerpo.

Hánse observado iguales fenómenos en los animales inferiores cuya temperatura, segun vamos á ver, es mucho más baja que la de las aves y mamíferos. Se ha creido por espacio de largo tiempo que los animales llamados de *sangre fría* no tenian calor propio, ó que el de su cuerpo era la temperatura del medio en que viven habitualmente. Esto dimanaba de la escasa diferencia que efectivamente existe entre ambas temperaturas, de la insuficiencia de los medios de observacion, y sobre todo de la accion frigorífica de la evaporacion, que impedia apreciar el débil exceso de la temperatura del animal sobre la del medio ambiente. Merced á los instrumentos termo-eléctricos se han podido allanar estas dificultades, y algunos observadores, como Nobili y Melloni, Becquerel y Dutrochet, han conseguido medir dicho exceso con tal precision que ha puesto fin á todas las dudas. Mencionemos solamente algunos resultados:

Nombres de los animales	Exceso de su temperatura sobre el medio ambiente
REPTILES:	
Rana	0°,50 á 0°,75
Sapo	0°,50 á 0°,75
Lagarto	0°,75 á 1°,25
Culebra	0°,75 á 1°,35
Boa	2°,50
Tortuga	1°,22 á 3°,90
Víbora	5°,56
PECES:	
Sollo	3°,88
Carpa	0°,86 á 0°,93
Anguila	0°,93
Trucha	1°,10
Tiburon	1°,30
ARTICULADOS, MOLUSCOS, ETC.:	
Escarabajo	0°,25 á 0°,70
Grillo	5°,80
Avispa	0°,50
Salton	0°,25 á 1°,77
Cetonia dorada	0°,25
Caracol	0°,90
Limaza	0°,25 á 1°,11
Holoturia tubulosa	0°,20 á 0°,60

En resúmen, todos los animales, cuando vivos, producen calor. Los unos, los superiores, gozan de la facultad de mantener su temperatura constante, cualesquiera que sean las circunstancias exteriores. En cambio, los animales parecen sujetos á la influencia decisiva del medio ambiente (1), sin dejar de poseer un exceso

(1) «Influye tan profundamente en los animales inferiores el estado físico del medio que los rodea, que su modo de vivir depende completamente de las circunstancias exteriores. En la estacion bonancible son ágiles, vivarachos, gozan de la plenitud de su vida; mas al acercarse el invierno empiezan á languidecer, y si el frio aumenta en

de temperatura que demuestra la produccion del calor propio de sus órganos. Por lo demás, esta produccion es tanto mayor en toda la extension de la escala animal cuanto más compleja la organizacion y más desarrolladas las funciones.

Réstanos enunciar las causas á que se debe atribuir dicha produccion, ó cuál es la naturaleza del orígen del calor en los animales.

A la doctrina de los antiguos que suponian que el calor animal es *innato* y que reside en el corazon (en el ventrículo derecho segun Aristóteles, y en el izquierdo segun Galeno), siguieron, primero, las explicaciones de Van Helmont, y luégo las de Hales. En concepto de aquel, habia que atribuir á reacciones químicas la calorificacion en el hombre y en los animales superiores; pero á la sazon la ciencia estaba muy poco adelantada para poder precisar la naturaleza de estas reacciones: Van Helmont suponia que en el corazon se mezclaban el azufre y la sal volátil de la sangre, y Silvio la veia en la efervescencia originada por el contacto de la linfa y del quilo. Los iatro-mecánicos como Hales atribuian el calor animal al frotamiento, diciendo que en el pulmon, en donde la velocidad de la sangre es mayor que en cualquiera otra parte, estaba el sitio principal de dicho desprendimiento, y que su elemento activo era el glóbulo.

Los trabajos de Priestley, y sobre todo los de Lavoisier en la época en que la química se constituia sobre bases positivas, facilitaron la verdadera solucion del problema. Desde 1789, fecha de la publicacion de la *Memoria sobre la respiracion de los animales*, se han hecho muchas investigaciones relativas al mismo asunto y reunido datos mucho más exactos acerca del problema de las causas del calor animal, pero las conclusiones del gran químico francés continúan inalterables. Reproduzcámoslas.

«Partiendo de los conocimientos adquiridos, decia Lavoisier, y concretándonos á ideas sencillas para que cada cual pueda fácilmente comprenderlas, diremos desde luégo y en general que la respiracion no es otra cosa sino una combustion lenta de carbono y de hidrógeno, en un todo semejante á la que se efectúa en una lámpara ó en una bujía encendida, y que, desde este punto de vista, los animales que respiran son verdaderos cuerpos combustibles que arden y se consumen.

»El aire de la atmósfera es el que suministra el oxígeno y el calórico para la respiracion lo propio que para la combustion; pero como en aquella, la sustancia misma del animal ó sea la sangre es la que proporciona el combustible, si los animales no repusieran habitualmente con los alimentos la que pierden con la respiracion, en breve faltaria aceite á la lámpara, y el animal pereceria del propio modo que se apaga una lámpara cuando carece de alimento.

»Las pruebas de esta identidad de efectos entre la respiracion y la combustion se deducen inmediatamente de la experiencia. Y en efecto, el aire que ha servido para la respiracion no contiene al salir del pulmon la misma cantidad de oxígeno; no tan sólo encierra gas ácido carbónico, sino tambien más agua de la que contenia ántes de la respiracion. Pues bien, como el aire vital no puede convertirse en ácido carbónico sino en virtud de una adicion de carbono, ni tampoco en agua sino añadiéndole hidrógeno, y no se puede efectuar esta doble combinacion sin que el aire vital pierda una parte de su calórico específico, resulta de aquí que el efecto de la respiracion es extraer de la sangre una porcion de carbono y de hidrógeno, dejando en su lugar otra porcion de su calórico específico que, durante la circulacion, se distribuye con la sangre por todas las partes de la economía animal, y mantiene esa temperatura casi constante que se observa en todos los animales que respiran.

»Creeríase que esta analogía que existe entre la combustion y la respiracion no habia pasado desapercibida de los poetas, ó mejor dicho, de los filósofos de la antigüedad, cuyos intérpretes y órganos eran. Ese fuego robado al cielo, esa antorcha de Prometeo, no tan sólo es una idea ingeniosa, sino tambien la pintura fiel de las operaciones de la naturaleza, á lo ménos en

su derredor, caen en tal estado de entorpecimiento, que todos los actos de su vida parecen momentáneamente suspendidos. Entónces es muy escasa la produccion de calor, y sin bajar hasta ser inferior al de los cuerpos circundantes, su temperatura se aproxima tanto más á la de estos cuanto más pronunciado es su entorpecimiento. Así pues, es necesario, so pena de exponerse á incurrir en graves errores, cuando se quiere estudiar la *temperatura propia* de estos animales, operar en circunstancias tales, que sus funciones estén en la plenitud de su ejercicio. Las observaciones suelen dar mejores resultados cuando el medio ambiente se mantiene entre 12° y 25°.» (Gavarret, *Del calor producido por los séres vivientes.*)

cuanto á los animales que respiran: puede, pues, decirse con los antiguos que la antorcha de la vida se enciende en el momento en que el niño respira por vez primera, y que no se apaga sino á su muerte.»

Despues de haber hecho observar que el hombre, más favorecido por la naturaleza que los demás animales, tiene una constitucion que le permite vivir á todas las temperaturas y en todos los climas, y de llevar, segun su necesidad y su capricho, una vida activa ó tranquila, y la respiracion y la nutricion activándose, aminorándose ó amoldándose á las circunstancias, Lavoisier añade: «Relacionando estas reflexiones con los resultados que las han precedido, se ve que la máquina animal está principalmente gobernada por tres reguladores: la respiracion que consume hidrógeno y carbono y que suministra calórico; la traspiracion, que aumenta ó disminuye, segun que es necesario arrebatar más ó ménos calórico; y por fin, la digestion, que devuelve á la sangre lo que pierde por la respiracion y la traspiracion.»

Hemos dicho que un gran número de sabios ha profundizado, con posterioridad á Lavoisier y á fuerza de observaciones y experimentos, la cuestion del orígen del calor animal. Los fenómenos físico-químicos de la respiracion y de la nutricion, la determinacion numérica de las cantidades de carbónico y de hidrógeno quemadas, la medicion del calor producido mediante procedimientos calorimétricos, la influencia de la alimentacion en la intensidad del de las combustiones respiratorias y por consiguiente en la temperatura de los animales, segun la naturaleza ó la cantidad de las materias alimenticias ingeridas, el estudio de los fenómenos que se observan cuando el animal, privado de alimento, pero sin dejar de absorber oxígeno, está reducido á quemar los materiales de sus propios órganos, como grasa, sangre, tejidos, todos estos problemas y otros muchos se han abordado y resuelto en gran parte; pero aún queda gran número de puntos oscuros cuya solucion depende á la vez de la física y de la fisiología. No pudiendo entrar en los detalles que exigiria la más sucinta reseña de los descubrimientos hechos relativamente á estos diversos puntos de la ciencia, nos limitaremos á demostrar con un ejemplo cómo se ha procedido para averiguar la parte que corresponde á la respiracion en la produccion del calor animal.

El método consiste: 1.º en medir la cantidad de calor perdida por un animal en un tiempo dado; 2.º en calcular el calor producido, deduciendo de la cantidad de oxígeno absorbido y del análisis de los gases espirados, la proporcion de carbono y de hidrógeno trasformados en ácido carbónico y en agua, y multiplicando el peso de cada uno de estos dos cuerpos quemados, por su calor de combustion.

Hé aquí (fig. 150) el aparato de que se ha valido Dulong para estas averiguaciones. Se compone de dos cajas concéntricas de hojalata, ambas de paredes muy delgadas, y separadas por ligeros soportes. La caja interior constituye el recinto destinado á contener el animal que sirve para el experimento, y al que se ha encerrado préviamente en una jaula de mimbre. Este recinto está en comunicacion con el exterior por dos tubos ó columnas de hojalata, una de ellas en relacion con un gasómetro lleno de aire; y la otra con uno lleno de agua. La primera columna penetra directamente en la caja interior y por ella se renueva constantemente el aire para la respiracion del animal. La segunda termina por abajo en un serpentin cuya abertura desemboca á la derecha de la caja: por ella salen los gases espirados, de suerte que, gracias al juego de los gasómetros, se mantiene de continuo una corriente de aire alrededor del animal. El agua del aparato se ha de agitar para que se distribuya uniformemente el calor cedido por el animal y por los gases que circulan por el serpentin. Un termómetro marca la temperatura del agua al principio ó al fin ó durante las varias fases del experimento.

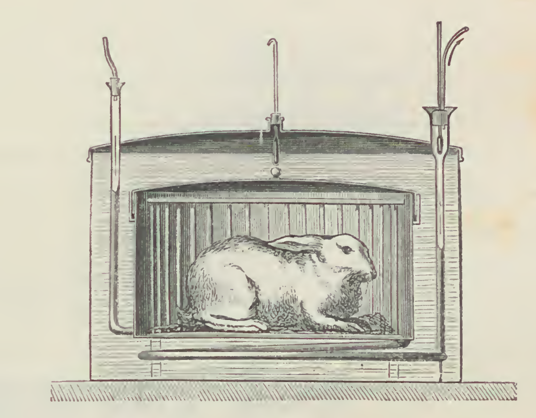


Fig. 150.—Aparato de Dulong para medir el calor desarrollado en el acto de la respiracion

Como se ve, el aparato no es otra cosa sino un calorímetro dispuesto de modo que el animal, viviendo en un aire renovado constantemente, pueda respirar en condiciones normales. Habíase analizado préviamente el aire suministrado; en virtud de otro análisis se conocia la composicion de los gases espirados; se cubicaban y medían los volúmenes y las temperaturas del aire y de los gases en cuestion, y del mismo modo se conocian y determinaban el peso en agua del calorímetro y su temperatura. Procediendo pues de este modo, Dulong podia calcular: 1.º el calor cedido por el animal al calorímetro en un tiempo dado; 2.º la cantidad total de oxígeno absorbido por aquel en el mismo espacio de tiempo; 3.º la del ácido carbónico exhalado. Segun los principios adoptados por dicho físico, los cuales no eran otros sino los formulados por Lavoisier, estos datos bastaban para calcular las cantidades de carbono y de hidrógeno quemadas por el animal, y que multiplicadas por sus calores de combustion, daban la cantidad total de calor desarrollada por la respiracion del animal (1).

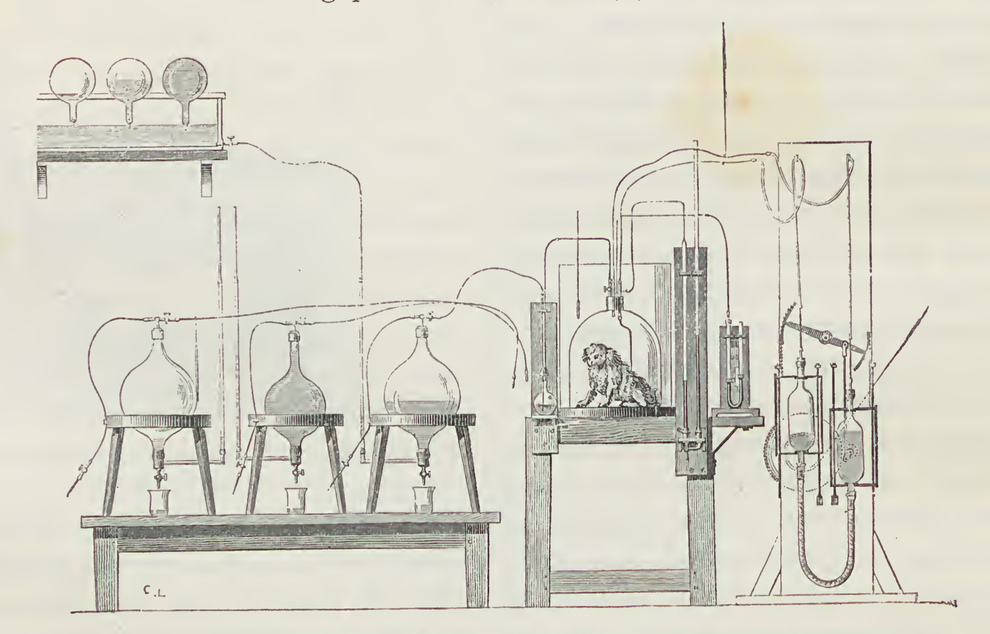


Fig. 151.—Aparato de Regnault y Reiset para el estudio de la respiracion de los animales.

En el método de Dulong y Petit, el agua del gasómetro absorbia parcialmente el ácido carbónico exhalado, de suerte que no se podia hacer la dosificacion con toda la exactitud apetecible. El procedimiento discurrido por Regnault y Reiset no adolece de este inconveniente, y las determinaciones de ambos físicos relativas á los datos de la respiracion animal son todo lo posible rigorosas. La figura 151 representa el aparato que han empleado con este objeto. Como se ve, el animal está metido en una campana de cristal tubulada, y cubierta con un cilindro de vidrio de mayor dimension que descansa en la misma peana que la campana. Este cilindro estaba lleno de agua á una temperatura constante. Véase ahora en virtud de qué disposicion el aire de la campana, á pesar de la absorcion de oxígeno por la respiracion del animal, conservaba por una parte una composicion constante, y cedia por otra el ácido carbónico exhalado. A la derecha del grabado se ven dos pipetas que comunican entre sí por un tubo de cautchuc vulcanizado, formando de este modo

(1) Despretz ha obtenido los mismos resultados por un método casi igual; pero Regnault y Reiset se han ocupado posteriormente de la misma cuestion, valiéndose de aparatos perfeccionados y de métodos más exactos que les han permitido eludir varias causas de error. Hé aquí, segun M. Gavarret, los resultados principales de estos últimos é importantes experimentos:

1.º Todos los animales absorben oxígeno que se combina con los materiales de la sangre. La cantidad de oxígeno absorbido varía con la clase y la especie zoológica, y en un mismo animal, con sus circunstancias fisiológicas.

2.º Todos los animales exhalan ácido carbónico; y aparte de algunos casos excepcionales y muy importantes, el peso del oxígeno del ácido carbónico exhalado es *menor* que el del oxígeno absorbido. Como todo este oxígeno queda eliminado en forma de agua y de ácido carbónico, la porcion de dicho gas que no se combina con el carbono se une al hidrógeno de la sangre, de suerte que la suma de las cantidades de oxígeno combinadas con el carbono y el hidrógeno representa siempre la totalidad del oxígeno absorbido por las superficies respiratorias.

3.º En el estado fisiológico ó de salud y sometidos á su alimentacion especial, los mamíferos y las aves exhalan *constantemente* nitrógeno ó ázoe, siquiera la exhalacion de este gas sea siempre muy escasa (por lo comun no llega á *un centésimo* del peso del oxígeno absorbido).

dos vasos comunicantes. Una y otra están llenas hasta su mitad de potasa cáustica, y por consiguiente el líquido tiene en ambas el mismo nivel. Por medio de un mecanismo de balancin las pipetas se movian verticalmente, elevándose la una miéntras bajaba la otra. A causa de este movimiento alternado, el líquido de la pipeta que subia, pasaba á la otra, y lo reemplazaba el aire de la campana que penetraba por un tubo que ponia en comunicacion á cada pipeta con ella. Al ponerse este aire en contacto con la potasa cáustica, perdia parte de su ácido carbónico, volvia á la campana en el momento en que la pipeta bajaba, y así sucesivamente.

Como el aire respirado por el animal perdia de este modo la cantidad de oxígeno absorbida por la respiracion y trasformada en ácido carbónico, su tension disminua sin cesar á medida que su composicion cambiaba. Era menester reemplazar este oxígeno, para lo cual servia la parte del aparato que se ve á la izquierda del grabado. Consistia esta parte en unas grandes redomas llenas de cloruro de cálcio en las que penetraba oxígeno puro por un tubo superior, miéntras que el cloruro salia por otro inferior. Dichas redomas estaban en comunicacion con un frasco lavador que contenia una solucion de potasa, y el oxígeno pasaba burbuja á burbuja, despues de atravesar esta solucion, á la campana en que estaba el animal sometido al experimento. La salida ó paso de dicho gas se efectuaba en virtud de la diferencia de presion del oxígeno de las redomas y del aire de la campana.

Así pues, el animal respiraba en un aire de composicion y temperatura constantes, y como además se recogia el ácido carbónico exhalado, podia valuarse rigorosamente la cantidad consumida de oxígeno así como la del ácido carbónico suministrado por la respiracion. Por otra parte, como únicamente el ácido carbónico desaparecia de la atmósfera de la campana, era posible analizar y dosificar los gases que la potasa no podia absorber, el nitrógeno, el hidrógeno carbonado ó libre, procedentes de las vías respiratorias ó digestivas y eliminados por el animal durante el experimento. Hé aquí algunos ejemplos de los resultados obtenidos por este método:

Animales.	Acido carbónico exhalado por hora	Oxigeno consumido: por hora	Oxigeno consumido: por hora y por kilógramo	Relacion del oxígeno contenido en CO^2 con el oxígeno absorbido
	gr.	gr.	gr.	
Perro alimentado con carne (peso 6k,393)	7,590	7,449	1,164	0,742
Gallina alimentada con avena (peso, 1k,610)	2,520	1,775	1,109	1,024
Cinco ranas (peso, 287 gramos)	0,0182	0,0181	0,063	0,729
Cuarenta saltones (peso, 40 gramos)	0,0472	0,0434	1,076	0,791

MM. Andral y Gavarret han obtenido los resultados siguientes relativos á la respiracion humana.

Edad de los individuos	Peso	Carbono quemado en 24 horas	Acido carbónico exhalado en 24 horas	Carbono quemado por kilógramo
	ks.	gr.	gr.	gr.
8 años	22,25	120,8	442,9	5,4
16 —	53,39	259,2	950,4	4,8
40 á 60	68,8 á 65,5	247,4	888,8	3,6
60 á 80	65,5 á 61,2	229,8	809,6	3,4

Resumiendo lo expuesto en este artículo diremos que el calor animal dimana enteramente de combustiones: el oxígeno del aire ambiente es el elemento comburente; los materiales orgánicos eliminados por la digestion el elemente combustible. Así pues cualquier animal debe á combinaciones químicas todo el calor indispensable para conservar la temperatura que para su existencia necesita.

IV

CALOR PRODUCIDO POR LOS VEGETALES

Hace ya mucho tiempo que se ha observado que los vegetales producian calor en el acto de la germinacion. Los cerveceros, para la preparacion de la *malta*, hacen pasar á los granos de cebada, préviamente empapados en agua y puestos en capas más ó ménos espesas sobre el

suelo asfaltado de las salas llamadas *germinaderos*, por un principio de germinacion. Durante esta operacion, los montones de granos se calientan espontáneamente, calor que es tanto mayor cuanto más rápida la germinacicn. Gœppert ha estudiado el mismo fenómeno en los granos ó simientes de varios vegetales, como trigo, avena, maíz, guisantes, cañamones, etc. Concretándose á la primera germinacion, á fin de evitar la causa de error en que podria incurrir si dejaba que se floreciesen, dicho físico observó que la temperatura de las simientes excedia á la de la atmósfera en los siguientes grados: 11°,25 á 12°,25 el trigo y la avena; 6°,25 á 7°,50 el maíz; 7°,5 á 8°,5 los guisantes y los cañamones, y 17°,5 el trébol.

El gran naturalista Lamarck fué quien hizo el primer estudio sobre la produccion del calor durante la florescencia, y en 1777 observó el notable caldeo que presentan los espádices del *Arum italicum* ó yaro de Italia en el momento de abrirse la espata ó de la dehiscencia de las anteras. Otros naturalistas observaron fenómenos parecidos en varias plantas de la familia de las aroideas; y los nombres de Sennebier, T. de Saussure, Hubert, Vrolick, Vriese, Dutrochet y otros muchos van unidos á estas indagaciones de fisiología y física vegetales. El exceso de la temperatura del espádice sobre la del aire ambiente puede llegar á 10 grados y áun pasar de ellos. M. Emery menciona en su obra titulada *La Vida vegetal*, una observacion curiosa hecha por Hubert, plantador de la isla de la Reunion. «La madre de Hubert, dice, era ciega. Paseándose cierto dia por el jardin, hubo de llamarle la atencion el suave olor que despedian unas flores; acercóse á ellas, las tocó segun costumbre de las personas afectadas de tan cruel enfermedad, y quedóse sorprendida al experimentar una sensacion de calor muy marcada. Llevó al punto la planta á su hijo, quien vió que era un *Arum*, y le participó su descubrimiento. Seducido Hubert por la novedad del fenómeno, lo estudió con cuidado y multiplicó y varió las condiciones del experimento. Una vez vió que la temperatura de un termómetro puesto entre cinco espádices atados juntos se elevó á 44°, siendo la del aire 19°: la influencia de doce espádices reunidos del mismo modo la hizo subir á 49°,5, ó sea 30°,5 más que la de la atmósfera. Los filodendros, otras especies de la misma familia, han dado con un solo espádice, excesos de temperatura de 15 á 18 grados.»

Teodoro de Saussure ha observado, en el momento de abrirse las flores de varios vegetales, un exceso de temperatura que llegaba á 1° en las flores masculinas de la calabaza, á 0°,5 en las hermafroditas de la bignonia de Virginia, y á 0°,3 en las florecillas de la tuberosa de los jardines. Pero la *Victoria regia*, esa reina de las aguas, de innumerables estambres y de dimensiones inusitadas, puesto que su diámetro,—aunque notablemente reducido por la cautividad,—aún llega á tres decímetros en nuestros invernaderos, era la flor que debia dar mayor número de grados; y en efecto, la temperatura de una de ellas, nacida en el Jardin botánico de Hamburgo, llegaba en el momento de abrirse á 40°,5 centígrados, miéntras que la del agua del acuario era tan sólo de 20°,8 y la de la atmósfera del invernadero de 28°,5. Otras flores, aunque no tan grandes, experimentan en la misma época un caldeo bastante notable; por ejemplo, el de la magnolia de grandes flores es de 3 á 4 grados.

Las observaciones practicadas por Dutrochet en los espádices de las aroideas le han hecho reconocer que existia una periodicidad cotidiana en el caldeo de estos órganos; viene á ser como los paroxismos de una fiebre, que llegan de dia á su máximum y de noche á su mínimum, y se repiten á la misma hora en una misma planta, y á horas distintas en plantas diferentes.

Pero si las plantas producen calor durante los períodos, muy limitados por cierto, de la germinacion y de la florescencia, ¿acontece lo propio en las demás épocas de su vida, durante el fenómeno ordinario de la vegetacion? Por espacio de largo tiempo se han tenido dudas acerca de ello, y áun de las observaciones ha resultado con frecuencia, en lugar de un exceso de temperatura, cierta disminucion con respecto á la del aire ambiente. Pero los experimentos de Dutrochet y de Gœppert han demostrado que estos resultados negativos procedian de que los observadores no habian tenido en cuenta las causas de error, como la radiacion, la conductibilidad y sobre todo la evaporacion. Veamos de qué medio se valia el primero

de dichos físicos para comprobar la produccion del calor en el fenómeno de la vegetacion. La figura 152 representa el aparato que empleaba con tal objeto: *a* y *b* son dos espárragos; al uno *b* se le ha marchitado sumergiéndole en agua á 50 grados; al otro *a*, enteramente igual al primero, se le ha metido luégo de cortado en un frasco lleno de agua fresca para que continuara viviendo. Se llena de arena una maceta

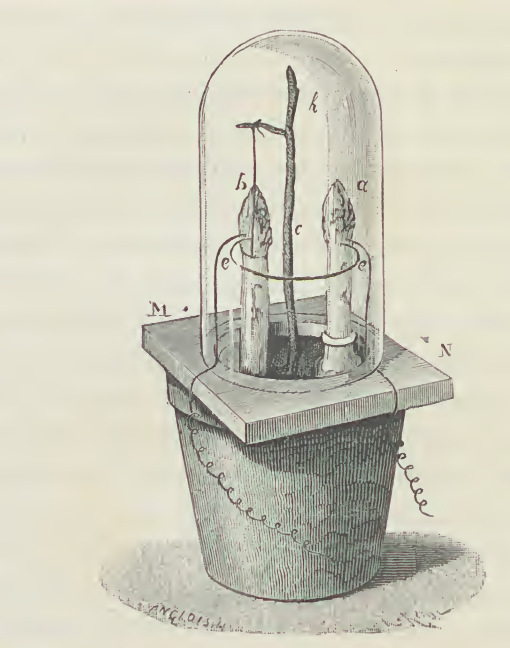


Fig. 152.—Aparato Dutrochet para medir el calor desarrollado en la vegetacion

y se ponen en ella los dos espárragos, uno en su frasco y el otro colgado de un hilo en una rama seca: en seguida se introduce en cada uno de ellos los dos extremos *ee'* de una aguja termoeléctrica *c*, cuyos hilos están empalmados al galvanómetro multiplicador. Se pone sobre la maceta una placa de yeso MN con una abertura á propósito, y se cubre todo ello con un fanal de vidrio. El aire del fanal se satura de humedad, de suerte que se evita toda evaporacion. De este modo ha observado Dutrochet en las partes verdes y vivas de los vegetales, un exceso de temperatura sobre el aire ambiente, exceso muy débil en verdad, por cuanto consiste en algunos décimos de grado, pero que no deja de ser efectivo y basta para probar que las plantas producen calor en el acto de la vegetacion ordinaria.

Para deducir las causas del calor propio de los vegetales, es preciso analizar las tres funciones principales de la germinacion, la florescencia y la vegetacion en general. Pues bien, de los muchos trabajos que á este efecto se han hecho resulta que la simiente necesita para germinar el oxígeno del aire, el cual le sirve para quemar una parte de su carbono y de su hidrógeno, y esta reaccion química es la que da lugar á la produccion del calor observado. Lo propio acontece con la que se manifiesta de un modo tan marcado en las flores, y sobre todo en los órganos de la reproduccion en el momento de la emision del pólen. Aparte de estos dos actos que sólo comprenden una parte limitada de la vida de la planta, el fenómeno de la vegetacion es más complejo. Sábese que, por efecto de la influencia de la luz, las partes verdes de las plantas de clorofila descomponen el ácido carbónico de la atmósfera, fijan el carbono y desprenden oxígeno, funcion que corresponde á la de la asimilacion en los animales. Otra funcion de la vida vegetal es la respiracion, que consiste, por el contrario, en la absorcion del oxígeno atmosférico y en el desprendimiento de ácido carbónico y de agua. Este último fenómeno es el que da lugar á la producion del calor propio de la vegetacion.

Estas dos funciones tan distintas reciben comunmente los nombre de *respiracion diurna* y de *respiracion nocturna*, porque la primera se efectúa de dia y la segunda principalmente de noche. Pero en esto hay una confusion que nuestro gran fisiologista Claudio Bernard ha hecho manifiesta en los siguientes términos:

«Con la denominacion única de respiracion vegetal, dice, se han confundido dos clases de hechos muy diferentes, y que no tienen ningun carácter comun, como no sea el que consisten en un cambio de gases entre la planta y la atmósfera. La verdad es que los dos fenómenos son directamente opuestos: uno que consiste en una absorcion de ácido carbónico, y una restitucion de oxígeno, miéntras que el otro consiste, por el contrario, en una absorcion de oxígeno y una formacion de ácido carbónico.

»El primero de estos fenómenos, ó sea el de la reduccion del ácido carbónico, es exclusivo de ciertos elementos del vegetal, de la clorofila, cuya facultad especial, inmanente en su sustancia, solamente se manifiesta cuando esta sustancia está sometida á la influencia solar. Débese, pues, reconocer aquí una propiedad limitada que depende de la irritabilidad funcional, y no

una propiedad general, fruto de la irritabilidad nutritiva. Podrá designarse, si se quiere, este modo de ser de la clorofila con el nombre de *propiedad clorofílica*, y asimilarla á todas las demás propiedades funcionales.

»Por el contrario, el fenómeno inverso, que consiste en una absorcion de oxígeno y un desprendimiento de ácido carbónico, depende de una propiedad general propia de toda célula orgánica y perteneciente á todo cuanto vive. Este fenómeno es enteramente semejante en el vegetal al acto respiratorio que se observa en los animales; y sólo merece el nombre de respiracion en los dos reinos.

»Los cambios gaseosos entre los vegetales y la atmósfera están dirigidos por dos influencias distintas y antagónicas: la *propiedad clorofílica* y la *propiedad respiratoria* propiamente dicha.

»Esta es enteramente general y comun á todos los elementos anatómicos vegetales ó animales; no se paraliza ni suspende jamás; y tiene todos los caracteres de la irritabilidad nutritiva, á saber, la continuidad y la universalidad. Se la observa en las flores, las yemas, las semillas, los tallos y las raíces; se la encuentra lo mismo en las plantas sin clorofila que en las orobánqueas y en los hongos; por último, existe así tambien en los órganos verdes, en los que constituye lo que se llama *respiracion nocturna* ó *respiracion á la sombra*, oponiéndola á la funcion diurna clorofílica que necesita de los rayos solares para ejercerse. Pero tanto de dia como de noche, á la sombra ó al aire ó en el agua, la respiracion no cesa jamás, porque su cesacion seria la muerte.

»En resúmen, la propiedad respiratoria propiamente dicha es comun al vegetal y al animal; uno y otro necesitan oxígeno para efectuar las combustiones orgánicas que tienen lugar en ellos. Hay aquí por tanto una sorprendente analogía que, en lugar de probar la dualidad de la vida en ambos reinos, evidencia por el contrario su armoniosa unidad.»

Vese pues en definitiva, y aquí queríamos venir á parar al colocarnos en el punto de vista exclusivamente físico, que el calor propio de los séres vivientes, animales ó vegetales, reconoce por causa un fenómeno de combustion, es decir, una combinacion química.

V

CALOR DESARROLLADO POR LAS ACCIONES MECÁNICAS

Las acciones mecánicas, el frotamiento, la percusion, la compresion, desarrollan calor, lo mismo que los movimientos más íntimos que constituyen los fenómenos de las combinaciones químicas. No faltan por cierto ejemplos de esta trasformacion del movimiento en calor, pudiendo cualquiera observarlos fácilmente. Citemos algunos.

Un boton de metal frotado con un paño ó con cualquier otro cuerpo sólido se calienta hasta el punto de quemar: los muchachos conocen perfectamente este medio de entretenimiento ó distraccion. El roce de una sierra contra la madera que divide, el de una navaja ó un cuchillo que se afila con una piedra, el de la lima con el metal que desgasta, elevan la temperatura de los objetos sometidos á este movimiento violento y cuyas moléculas sufren por tal manera ruda agitacion. Las chispas que las herraduras de los caballos hacen brotar de las piedras de la calle, las que produce el roce del acero contra la piedra del amolador, las del eslabon que inflama la yesca al chocar contra el pedernal, proceden de la alta temperatura desarrollada por el frotamiento; despréndense partículas metálicas muy tenues, y el calor producido basta para poner esas pequeñas masas en estado de incandescencia (1).

Si se frotan uno contra otro dos pedazos de madera bien secos, se calientan y sale humo de ellos; y si se ha de dar crédito á los relatos de los viajeros, los salvajes consiguen encender fuego por este medio. Los torneros hacen esos filetes negros que á veces se ven en los objetos labrados por ellos, apretando con fuerza un pedazo de madera afilado sobre el punto que quieren ennegrecer: el caldeo que resulta de esta presion, unido al rápido movimiento de rotacion del torno, es bastante fuerte para carbonizar la madera en el contorno del objeto. Los muñones de las máquinas, los ejes de los carruajes, de los wagones de los ferro-carriles

(1) «Antes de la invencion de las lámparas de seguridad de Davy, el gas *grisú* era la gran plaga de las hulleras, quedando muchas minas sin explotar á causa de la presencia de tan invencible enemigo. Como sólo se podian usar las lámparas ordinarias, se habia ideado alumbrar las minas con una rueda de acero que girara contra una piedra de chispa. (Simonin, *La vida subterránea*.)

se calientan sobremanera á causa del roce que resulta de una rotacion rápida y prolongada, y hasta se prenderian fuego si no se tuviese cuidado de lubrificarlos engrasándolos.

Como ejemplo de la gran cantidad de calor que puede desarrollar el frotamiento de dos cuerpos sólidos uno contra otro, es digno de mencion el célebre experimento hecho por Rumford en 1798, y que se le ocurrió al ilustre físico miéntras vigilaba en Munich la perforacion de cañones. Habiéndole llamado la atencion la extraordinaria cantidad de calor producida por esta operacion, quiso medirla con la posible exactitud, y á este fin puso un cilindro metálico, que se debia perforar, en una caja de madera llena de agua cuya temperatura la marcaba un termómetro metido en ella. A la hora de haber empezado el frotamiento del taladro contra el cilindro, la temperatura del agua, que al principio era de 16°, subió á 46°, á las dos horas á 81°, y por último media hora despues entraba en plena ebullicion. «Seria difícil, dice Rumford, expresar la sorpresa y el asombro retratados en el rostro de los circunstantes al ver tan gran cantidad de agua (unos diez litros) que se calentaba y hervia sin fuego alguno.»

Despues de mencionar Tyndall, en sus *Lecciones sobre el calor*, el célebre experimento de Rumford, hace observar á sus oyentes que carece de tiempo para repetirlo en sus condiciones primitivas; «pero, añade, puedo mostraros en sustancia el mismo efecto *en dos minutos y medio*. Aquí tengo un tubo de cobre, de 10 centímetros de largo por 2 de diámetro: está tapado en el fondo y le atornillo verticalmente sobre una mesa con rueda y manubrio para hacerle girar rápidamente. Tengo además dos pedazos de madera de encina reunidos por una charnela y en los cuales hay practicadas dos ranuras semicirculares, entre las que ha de pasar el tubo de cobre. Estos pedazos de madera forman una especie de pinzas, y apretando poco á poco, puedo producir un roce entre la madera y el tubo de cobre puesto en rotacion (fig. 153). Lleno casi el tubo de agua fresca, lo tapo con un tapon de corcho para impedir que el líquido se escape y me salpique, y pongo el aparato en movimiento. Miéntras este continúa, va subiendo la temperatura del agua, y aunque aún no hayan trascurrido los dos minutos y medio, los que están cerca del aparato pueden ver cómo el vapor se escapa por el tapon. Hoy he hecho tres ó cuatro veces que la fuerza del vapor lo despida hasta siete metros de altura, y así vuelve á suceder ahora; el vapor sigue al tapon, y al precipitarse, forma esa nubecilla que veis en la atmósfera.»

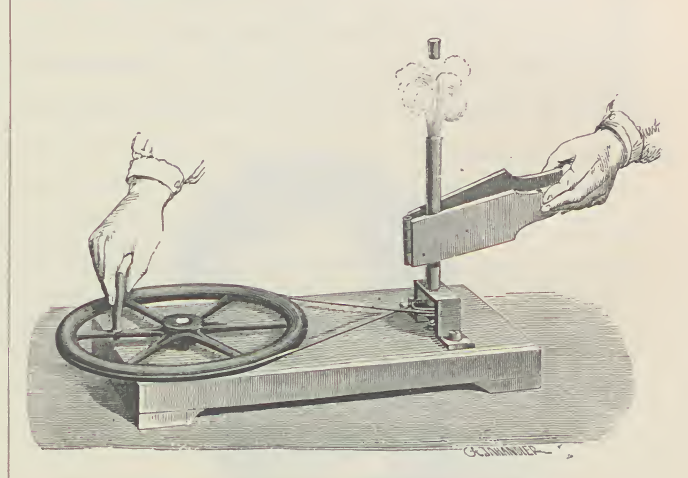


Fig. 153.—Experimento de Tyndall. Calor desarrollado por el roce

La frotacion de los sólidos contra los líquidos y los gases desarrolla tambien calor: un experimento de Joule, del cual volveremos á ocuparnos, ha hecho patente el caldeo de una masa líquida, agitada por unas paletas metálicas que giraban alrededor de un eje. Por espacio de mucho tiempo se ha atribuido la incandescencia de los aerolitos que atraviesan con gran velocidad la envolvente aérea de nuestro globo al frotamiento contra las capas de la atmósfera; pero Regnault ha demostrado que tiene por causa otra accion mecánica, la compresion. La elevacion de temperatura originada por el frotamiento de una masa gaseosa contra un cuerpo sólido está puesta fuera de duda por un experimento muy sencillo que Tyndall ha hecho en sus conferencias sobre el calor; con un fuelle lanzaba una corriente de aire sobre una de las caras de la pila termo-eléctrica, y al punto se desviaba la aguja del galvanómetro, indicando el sentido de su desviacion que el aire puesto en movimiento habia calentado la cara de la pila.

Terminemos esta enumeracion de fenómenos, todos los cuales demuestran la generacion del calor por una fuerza mecánica, mencionando un experimento importante de Davy, el cual, frotando entre sí dos pedazos de cristal bien secos, consiguió fundir cierta cantidad de agua

sólida. Lo que da mayor interés á este experimento es que para explicar el desprendimiento de calor que produce el roce, los partidarios de la materialidad del calor, los que lo consideraban como un flúido contenido en los intersticios de las moléculas de los cuerpos, razonaban de este modo: «El roce cambia la capacidad calorífica de los diferentes cuerpos; disminuye esta capacidad, de suerte que el calor almacenado ántes de la accion mecánica no puede permanecer por completo en el cuerpo despues del cambio molecular de que se trata, y este calor es el que se desarrolla por frotamiento, y de latente que era se torna perceptible. «Pero el experimento de Davy hace imposible esta explicacion. Y en efecto, recordemos que el agua tiene doble capacidad calorífica que el hielo; despues de derretir cierta cantidad de este, el agua resultante contiene más calor latente que ántes; no se podria pues comprender de dónde procede el calor que ha servido para producir el paso del hielo al estado líquido. Y por último, dedúcese de aquí que la fuerza mecánica que interviene en el roce es la que se trasforma en calor, es decir, en una fuerza de otra clase: hay trasformacion de un movimiento visible en otro molecular ó atómico.



Fig. 154.—Humphry Davy

La percusion y la compresion desarrollan calor lo mismo que el frotamiento. Cuando se mete un clavo á martillazos en un madero, no tan sólo se calienta, efecto que puede resultar en parte del frotamiento, sino que en el martillo mismo (si su masa no es muy considerable comparada con la del clavo) se nota cierta elevacion de temperatura. Una barra de hierro, batida á golpes repetidos, puede calentarse hasta ponerse candente. Los discos de oro, plata ó cobre, comprimidos bajo el balancin que sirve para acuñar moneda, se calientan, pero la elevacion de la temperatura no es la misma en todos los metales. Un curioso experimento de Tyndall hace ver el desarrollo de calor que resulta de la compresion de la madera. «Aquí tengo, dice, un pedazo de abeto, á una temperatura inferior á la de esta sala, y que al ponerse en contacto con la pila termo-eléctrica, produce en la aguja la desviacion que indica frio. Pongo esta madera entre las placas de una pequeña prensa hidráulica y la comprimo fuertemente. Como podeis observar, dichas placas están á una temperatura menor que la de la habitacion. Despues de la compresion, pongo la madera en contacto con la pila: ya veis el efecto. El galvanómetro nos dice que el acto de la compresion ha desarrollado calor.» Por lo general, la cantidad de calor desarrollada por las acciones mecánicas depende de la naturaleza de las sustancias sometidas á estas acciones, del estado de su superficie y de la presion ejercida.

La compresibilidad de los líquidos es muy débil; sin embargo, ejerciendo sobre masas líquidas presiones considerables, como de 30 á 40 atmósferas, se ha podido notar desprendimiento de calor. La compresion de los gases puede ejercerse entre límites sumamente extensos; así es que se obtiene una elevacion de temperatura bastante considerable cuando se comprime bruscamente una masa gaseosa en un espacio limitado. Este hecho sirve de principio al *eslabon de aire ó neumático* (fig. 155). Para que se inflame el pedazo de yesca fijo al extremo del émbolo, se ha de

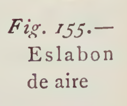


Fig. 155.—Eslabon de aire

reducir el aire interior por compresion á la duodécima parte de su volúmen. La elevacion de temperatura que resulta de esta disminucion brusca del volúmen del aire, es de unos 500°, al paso que bastan 300° para que se encienda la yesca: una notable porcion del calor desarrollado la absorben las paredes del instrumento y el émbolo, cuya masa es mucho mayor que la del aire interior.

La expansion del gas produce el efecto contrario de la compresion, es decir, una baja de temperatura; hemos visto gas ácido carbónico, comprimido primeramente á 40 ó 50 atmósferas en un recipiente, y liquidado despues, enfriarse de tal modo por la dilatacion que produce su paso al aire libre, que pasa del estado líquido al sólido en forma de copos, blancos como la nieve. Su temperatura desciende entónces hasta 100° bajo cero.

Ocurre el mismo fenómeno de enfriamiento cuando el vapor de agua sale á chorros de una caldera de alta presion, por ejemplo de la válvula de la marmita de Papin. Su dilatacion repentina va acompañada de un enfriamiento que lo condensa en forma de niebla espesa; y metiendo la mano en el chorro de vapor, se experimenta una sensacion de frio que al pronto sorprende. Pero hay que guardarse de hacer esta prueba cuando el vapor contenido en la caldera está á la presion atmosférica ordinaria, porque como entónces conserva la temperatura de 100°, se abrasaria la mano el que la metiera en él.

CAPITULO XVI

NOCIONES DE TERMODINÁMICA

I

HIPÓTESIS ANTIGUAS SOBRE LA NATURALEZA DEL CALOR

Hemos llegado al término de nuestra descripcion de los fenómenos y de las leyes del calor. Dejando á un lado, por exigirlo así nuestro plan, todo cuanto se refiere á la parte matemática de esta rama de la física, para concretarnos á la demostracion experimental de las leyes, hemos podido pasar revista á las principales propiedades que se manifiestan en los cuerpos sometidos á la accion del agente calorífico, propiedades que, en último análisis, se reducen á dos: variaciones de volúmen y cambios de estado. Agregándoles las leyes que caracterizan los dos modos de propagacion del calor por vía de radiacion y de conductibilidad, así como el estudio de los principales focos naturales ó artificiales de calor, ha quedado completa la exposicion elemental que nos habíamos propuesto.

Si resumimos de este modo en pocas líneas la materia de los capítulos que preceden, es para hacer observar al lector que, en ningun caso, nos ha sido necesario formular ninguna hipótesis sobre la naturaleza del calor. La medida de las dilataciones de los sólidos, de los líquidos y de los gases, los procedimientos termométricos que de ella se deducen son muy suficientes para definir el estado térmico de un cuerpo ó de un medio, y para conocer, consultando los resultados de la experiencia, las leyes del equilibrio de temperatura en un sistema cualquiera. Estas leyes pueden ser muy complicadas, mas para establecerlas no es necesario saber lo que es el calor en sí. Lo propio sucede con todo cuanto concierne á los cambios de estado, fenómenos de transicion ó de rotura de equilibrio entre las moléculas de los cuerpos, especie de puntos críticos en dependencia íntima con las variaciones aisladas ó simultáneas de presion y de temperatura. Tampoco ha sido indispensable el conocimiento de la naturaleza del calor para determinar las cantidades del que se absorbe ó desprende en tal ó cual fenómeno, como caldeo, enfriamiento, liquefaccion, solidificacion, combustion, etc. Al llegar al estudio de los manantiales de calor es cuando únicamente nos vemos inducidos á plantear, para ir aún más allá, el problema de la causa del calor, de la naturaleza física ó mecánica del agente

que adquiere nacimiento en la combinacion química, en el roce, la percusion, etc.

Sin embargo, en virtud de una tendencia puramente irresistible del espíritu humano, los físicos, lo propio que los filósofos de todos los tiempos, han agitado, ya que no resuelto, el problema en cuestion. Siempre ha sucedido lo mismo, sin gran provecho para la ciencia. Buscar la causa de las cosas ántes de haber reunido y clasificado los hechos, de haber interrogado la naturaleza por el método riguroso de la observacion experimental y de formular las leyes de los fenómenos, leyes que no se pueden hacer patentes sino á fuerza de mediciones contínuas y precisas y de múltiples verificaciones, es seguir una marcha contraria á la que la historia entera de las ciencias físicas y naturales nos presenta como la única fructuosa. Guardando el respeto debido á los filósofos que, por otros conceptos, han sido grandes genios, podemos sostener que ni Aristóteles ni los peripatéticos han difundido gran luz sobre la naturaleza del calor, cuando lo definen diciendo que «es una cualidad ó un accidente que reune ó junta cosas homogéneas, es decir, de la misma naturaleza y especie, y que destruye ó separa cosas heterogéneas ó de naturalezas distintas.» Los epicúreos no estaban más adelantados en el conocimiento de las cosas, cuando decian que «el calor es la sustancia volátil del fuego mismo, reducida á átomos y emanada de los cuerpos ígneos por un movimiento contínuo.» Esta es, sobre poco más ó ménos, una de las hipótesis que se han propuesto en nuestros dias para explicar el calor; pero es inútil decir que tan vagas fórmulas no han sido ni podian ser de utilidad alguna para el progreso de la ciencia.

La opinion de Demócrito, de que el calor es una sustancia *sui generis*, ha sido adoptada en los tiempos modernos por químicos y físicos tales como Homberg, Lemery, Gravesande y Boerhaave. D'Alembert da en su *Enciclopedia*, en los términos siguientes, el análisis de las ideas que profesaba este último sobre el calor ó sobre el fuego. «Lo que llamamos fuego es un cuerpo por sí mismo, *sui generis*, que desde el principio ha sido creado tal cual es, que no puede ser alterado en su naturaleza ni en sus propiedades, que no puede ser producido de nuevo por ningun otro cuerpo, y que no se le puede cambiar en otro alguno, ni cesar de ser fuego. Este fuego está difundido con igualdad por todas partes, y existe en cantidad igual por todas las partes del espacio; pero está perfectamente oculto é imperceptible, y no se descubre sino en virtud de ciertos efectos que produce, y que caen bajo el dominio de nuestros sentidos. Estos efectos son el *calor*, la *luz*, los *colores*, el *enrarecimiento* y la *quemadura*, que son otros tantos indicios de fuego, y ninguno de los cuales puede ser producido por otra causa, sea la que fuere.» Para que se produzca cualquiera de estos efectos, han de mediar ciertas circunstancias, y especialmente que el fuego se aglomere ó reduzca en un espacio más estrecho. Esto es lo que producen los cuerpos luminosos ó incandescentes, ó los procedimientos de concentracion de los rayos, como los espejos cóncavos y las lentes, ó en fin, las acciones mecánicas, tales como el frotamiento. Fácil es ver, en estas ideas de Boerhaave, la doctrina de la materialidad del calor que profesan aún muchos físicos de nuestro siglo y que se traducia en sus escritos por la expresion significativa de *calórico*. Verdad es que hoy todavía se sigue usando esta palabra, pero sin que las personas científicas que la emplean le atribuyan el estricto sentido de una sustancia especial que constituye el calor.

La segunda hipótesis es la que considera el calor, no ya como una sustancia, sino como un movimiento, y que ha tenido en los últimos siglos muchos partidarios. Segun Bacon *(Novum organum, de formâ calidi)*, «el calor es un movimiento de extension, en virtud del cual un cuerpo se esfuerza en dilatarse, ó en darse mayor extension que la que ántes tenia; este movimiento no es igual ó uniforme, ni en todo el cuerpo, sino que existe únicamente en sus partes más pequeñas, como parece por el temblor ó la trepidacion alternativa de las partículas de los líquidos calientes, del hierro enrojecido, etc., y en fin, este movimiento es sumamente rápido.» En una palabra, el filósofo inglés define el calor diciendo que es «un movimiento de extension y de ondulacion en las partes pequeñas de un cuerpo, que las obliga á dirigirse con cierta rapidez hácia la circunferencia, elevándose un poco al mismo tiempo. Y añade que «si se puede excitar en algun cuerpo natural un

movimiento que le obligue á extenderse y á dilatarse, ó dar á este movimiento una direccion tal en el mismo cuerpo que la dilatacion no se efectúe de un modo uniforme, sino que afecte solamente á ciertas partes, no habrá calor.»

Estas vagas definiciones están indudablemente basadas en hechos mejor ó peor observados ó interpretados, siendo á lo que parece las agitaciones visibles de los cuerpos muy caldeados las que han sugerido á Bacon su idea de un movimiento molecular.

Boyle adopta tambien la hipótesis de la naturaleza mecánica del calor, que «parece consistir principalmente, dice, en esa propiedad de la materia que se llama *movimiento,»* pero mediando ciertas condiciones, por ejemplo, «que la agitacion de las partes del cuerpo sea violenta, que la determinacion del movimiento sea diversificada, y que se dirija en todos sentidos. Es menester además que todas las partículas agitadas, ó cuando ménos la mayor parte, sean demasiado pequeñas para no hacerse perceptibles.» Esta última condicion prueba que Boyle se formaba una idea mucho más clara y profunda que Bacon de la clase de movimiento que constituye el calor. Aparte de esto, insiste sobre todo en la posibilidad de producir calor por las solas acciones mecánicas, y en su apoyo cita experimentos que hoy se aducen del mismo modo y en favor de la misma hipótesis. «En la produccion de calor, dice, ni el agente ni el paciente *ponen nada de su parte, como no sea el movimiento y sus efectos naturales.* Cuando un herrador bate con fuerza un hierro, el metal se pone sumamente caliente; y sin embargo, nada interviene para que pueda ponerse así como no sea la fuerza del movimiento del martillo que imprime en las partes más pequeñas del hierro una agitacion violenta y diversamente determinada; de suerte que este hierro, que ántes era un cuerpo frio, recibe *calor* por la agitacion impresa en sus partes pequeñas. Este hierro se pone caliente, primero, con relacion á algunos otros cuerpos en cuya comparacion estaba frio ántes; luégo adquiere calor de una manera sensible, porque esta agitacion es más fuerte que las de las partes de nuestros dedos, y en este caso suele suceder que el martillo y el yunque continúen frios despues de la operacion. Lo que muestra que el calor adquirido por el hierro no se lo comunicaba ninguno de aquellos dos instrumentos por estar calientes, es que el calor lo produce en él un movimiento sobrado considerable para agitar violentamente las partes de un cuerpo tan pequeño como el pedazo de hierro en cuestion, sin que dicho movimiento sea capaz de causar el mismo efecto en masas tan grandes como las del martillo y el yunque. Con todo, si se repitieran á menudo y con presteza los golpes, y el martillo fuese pequeño, este podria calentarse tambien; de donde se sigue que no es necesario que un cuerpo esté caliente para comunicar *calor.*

»Si se mete con un martillo un clavo grueso en un pedazo de madera, se le descargarán muchos golpes en la cabeza ántes que se caliente; pero tan luégo como el clavo haya penetrado en la madera hasta la cabeza, bastarán unos cuantos golpes para hacerle adquirir un calor considerable; porque, miéntras á cada martillazo el clavo penetra más y más en la madera, el movimiento producido en esta es principalmente progresivo, y obra sobre el clavo entero dirigido hácia un solo y mismo lado; mas cuando cesa este movimiento progresivo, como la sacudida impresa por los martillazos es incapaz de profundizar más el clavo, ó de romperlo, menester es que produzca su efecto imprimiendo en las partes de este una agitacion violenta é interior, en la cual consiste la naturaleza del *calor.»*

Newton consideró tambien el calor, segun parece, como un movimiento vibratorio de las moléculas de los cuerpos, conforme resulta de muchos párrafos de su *Optica*: «Los cuerpos y la luz, dice, ¿no obran mutuamente, uno sobre otro, es decir, los cuerpos sobre la luz despidiéndola, reflejándola, rompiéndola y doblándola, y la luz sobre los cuerpos, caldeándolos y dando á sus partes *un movimiento de vibracion en el cual consiste el calor?» (Cuestion V.)* Y en otra parte: Cuando todos los cuerpos fijos se calientan más allá de cierto grado, ¿no despiden luz, no brillan? ¿Y no producen esta *emision* las vibraciones de sus partes? Todos los cuerpos que abundan en partes terrosas y sobre todo en partes sulfurosas, ¿no difunden luz siempre que estas partes están suficientemente agitadas, ya provenga esta agitacion de calor, ó de friccion, percusion, putrefaccion, de cual-

quier movimiento vital ó de otra causa?» (*Cuestion VIII.*)

Verdad es que algunos partidarios de la hipótesis del calor considerado como sustancia, convenian tambien en esta misma agitacion de las moléculas de los cuerpos; sólo que entónces no era ya causa, sino efecto, porque se la comunica el fuego que contienen. Gravesande dice, por ejemplo, «que el *calor* en el cuerpo caliente es una agitacion de sus diferentes partes efectuada por medio del fuego contenido en este cuerpo.»

II

LAS DOS HIPÓTESIS MODERNAS SOBRE LA NATURALEZA DEL CALOR

Lleguemos ya á los físicos modernos y veamos cómo formulan las dos hipótesis opuestas, la del calor considerado como una materia propia, á la cual dan el nombre de *calórico*, y la que ve en el calor un modo de movimiento. En la Memoria de Laplace y de Lavoisier sobre el calor específico de los cuerpos, se encuentran las definiciones siguientes, que en nuestro concepto llevan más particularmente el sello del carácter del autor de la *Mecánica celeste:*

«Los físicos no están de acuerdo acerca de la naturaleza del calor. Muchos de ellos lo consideran como un flúido difundido por toda la naturaleza, y del que están más ó ménos penetrados los cuerpos en razon de su temperatura y de su aptitud particular para conservarlo; puede combinarse con ellos, y en tal estado, cesa de actuar sobre el termómetro y de comunicarse de un cuerpo á otro; y únicamente en estado de libertad, estado que le permite ponerse en equilibrio en los cuerpos, forma lo que llamamos *calor libre.*

»Otros físicos opinan que el calor sólo es resultado de los movimientos insensibles de las moléculas de la materia. Sábese que hasta los cuerpos más densos están llenos de muchísimos poros ó pequeños vacíos, cuyo volúmen puede ser considerablemente mayor que el de la materia que contienen; estos espacios vacíos dejan á sus partes imperceptibles la libertad de oscilar en todos sentidos, siendo natural pensar que estas partes se hallan en agitacion continua, la cual, si aumenta hasta cierto punto, puede desunirlas y descomponer los cuerpos, y este movimiento intestino es el que, en sentir de los físicos á que nos referimos, constituye el calor.

»Para explanar esta hipótesis haremos observar que, en todos los movimientos en los cuales no hay cambio brusco, existe una ley general que los geómetras han designado con el nombre de *principio de la conservacion de las fuerzas vivas*, ley que consiste en que, en un sistema de cuerpos que actúan unos sobre otros de cualquier modo, la fuerza viva, esto es, la suma de los productos de cada masa por el cuadrado de su velocidad, es constante. Si los cuerpos están animados por fuerzas aceleradoras, la fuerza viva es igual á lo que era en el principio del movimiento, más la suma de las masas multiplicadas por los cuadrados de las velocidades originadas por la accion de las fuerzas aceleradoras. En la hipótesis que examinamos, el calor es la fuerza viva que resulta de los movimientos imperceptibles de las moléculas de los cuerpos; la suma de los productos de la masa de cada molécula por el cuadrado de su velocidad.

»Si se ponen en contacto dos cuerpos de diferente temperatura, las cantidades de movimiento que se comunican recíprocamente serán desiguales al principio; la fuerza viva del más frio aumentará en la misma cantidad en que disminuye la del otro, y este aumento subsistirá hasta que se igualen las cantidades de movimiento comunicadas por una y otra parte; en este estado la temperatura de los cuerpos habrá llegado á la uniformidad.

»No decidiremos entre las dos hipótesis precedentes; hay muchos fenómenos que parecen favorables á la última, por ejemplo, el del calor producido por el roce de dos cuerpos sólidos; pero otros tienen en la primera explicacion más sencilla; quizás tengan lugar ambas á la vez.»

Desde la época en que se escribieron estas líneas (1), los físicos han continuado divididos

(1) Al citar Verdet en su *Exposicion de la teoría mecánica del calor*, publicada en 1870, las líneas más características de estos párrafos, hace observar que Laplace y Lavoisier no han hecho uso en sus trabajos sobre el calor de estas nociones, tan claras y precisas que, no comparándose jamás en ellas el calor sino consigo mismo, «importa poco para la fecundidad de sus raciocinios que consideren este calor como un cuerpo indestructible ó como una cantidad de fuerzas vivas.» Cuando Lavoisier escribió en 1789 su *Tratado de química*, tuvo buen cuidado de decir que la expresion de *calórico* con la cual designaba, de acuerdo con Fourcroy, la causa del calor, tenia la ventaja «de poder adaptarse á toda clase de opiniones, puesto que, rigurosamente hablando, ni siquiera estamos obligados á suponer que el calórico sea una

entre las dos hipótesis de la materialidad del calor y de su naturaleza puramente dinámica. A la verdad, la palabra *calórico*, usada generalmente por unos y otros, no era más que un modo de designar, para mayor comodidad del lenguaje, la causa desconocida de los fenómenos del calor: es una reserva que ha sido comun á todos; y como el estudio de los hechos, las experiencias que sugeria, tenian ante todo por objeto la averiguacion de sus leyes, y no requerian que se hiciese una eleccion entre ideas puramente teóricas, los progresos de la ciencia no se hubieran resentido de esta incertidumbre. Lo propio habia sucedido con respecto á la óptica y á la teoría de la luz, que ha tenido divididos á los sabios entre dos hipótesis opuestas, la de la emision ó materialidad de la luz, y la de las ondulaciones, que considera la luz como un movimiento vibratorio que se propaga por efecto de las ondulaciones del éter. Ha triunfado esta última teoría, tan admirablemente formulada por Fresnel y confirmada definitivamente por el estudio experimental de toda una serie de fenómenos que son su consecuencia directa, al paso que quedaban sin explicacion en la hipótesis de la emision.

Dos series de fenómenos han contribuido tambien á inclinar la balanza en favor de la teoría que hacia consistir el calor en un movimiento de las moléculas de los cuerpos. La primera comprende todos los hechos que se refieren á la propagacion del calor por vía de radiacion. Hemos visto que las leyes de esta propagacion son idénticamente las mismas á que obedece la propagacion de la luz. Llamándole la atencion estas analogías, Melloni habia deducido de ellas que hay una identidad completa entre la luz y el calor y que tienen la misma causa. «Es una conclusion, dice, que concuerda perfectamente con la uniformidad de las leyes generales de propagacion, reflexion, interferencia y polarizacion que se han comprobado en toda clase de rayos. La *identidad* de la luz, del calor y de la radiacion química, ó más exactamente, la igualdad perfecta en la constitucion de las varias ondulaciones etéreas que forman las radiaciones elementales de estos tres agentes, puede pues considerarse en adelante como una verdad conquistada para la ciencia...

»La luz, el calor y las radiaciones químicas son tres manifestaciones de las ondulaciones etéreas que constituyen la radiacion solar. Las ondulaciones oscuras, dotadas de la accion química ó calorífica, son en un todo semejantes á las ondulaciones luminosas, difiriendo tan sólo en la longitud. Pero este carácter distintivo pertenece á la *especie* y no al *género*; y precisamente existe tanta divergencia entre un rayo oscuro químico ó calorífico y otro de luz como entre dos rayos luminosos de colores diferentes. Verdad es que las radiaciones luminosas se distinguen de todas las demás por su accion en la facultad visiva; pero esta propiedad se deriva de una verdadera *cualidad accidental*, y no tiene importancia alguna con relacion á la radiacion considerada en sí misma...

»El calor desarrollado en los cuerpos heridos por las radiaciones consiste en la cantidad de movimiento comunicada á los cuerpos ponderables por las pulsaciones del éter; la luz, en las oscilaciones moleculares de la retina y de los objetos exteriores, sincrónicos con cierta serie de ondulaciones etéreas; y la accion química, en las separaciones de los átomos causada por la extraordinaria violencia con que á veces ocurren estas mismas vibraciones, sincrónicas de los cuerpos.

»Las ondulaciones del éter dejan de ser visibles cuando sus pulsaciones son demasiado rápidas ó sobrado lentas para originar las vibraciones de la retina, en virtud de un principio totalmente análogo á la resonancia; por el contrario, producen el máximum de sensacion luminosa cuando se encuentran en la mayor *concordancia* posible con la *elasticidad* de las moléculas nerviosas que constituyen esta membrana del ojo. Por la misma razon, ciertas ondulaciones etéreas son incapaces de excitar las reacciones químicas, al paso que otras están dotadas de esta propiedad en el más alto grado. Resulta de aquí que la accion química y la luz dependen más bien de la *calidad* de las ondulaciones que de su *fuerza de impulso* ó de su *cantidad*

---

materia real; basta que sea una causa repulsiva cualquiera que separe las moléculas de la materia, y de este modo se pueden considerar sus efectos de una manera abstracta y matemática. Laplace, por el contrario, no ha mantenido sus reservas, y Verdet hace observar con razon que desde la época de su asociacion con Lavoisier, en todo cuanto ha escrito se ha mostrado defensor convencido de la materialidad del calórico. «Su imponente autoridad, dice, ha hecho que queden partidarios de esta teoría cuando hacia ya largo tiempo que no descansaba en la menor prueba.»

de movimiento. Concíbese muy bien, por consiguiente, por qué la zona más iluminadora y la que mayor efecto químico produce no se encuentran en el espectro con la zona de temperatura más elevada.»

Despues de haber demostrado cómo la hipótesis de la identidad da cuenta de los efectos variables de difusion, trasmision y absorcion por las sustancias blancas incoloras, que no son incoloras sino para la vista, pero que en realidad son termocróicas, Melloni termina diciendo que «el calor es el único agente capaz de medir las fuerzas ó intensidades relativas de los rayos elementales que componen las radiaciones del Sol y de los focos terrestres. La luz y la accion química no podian servir para este objeto; porque no siempre son proporcionales á la causa eficiente, y sólo representan efectos diversos de la mayor ó menor facilidad con que las moléculas ponderables situadas en la superficie de los cuerpos siguen los períodos de las ondulaciones etéreas.»

La ciencia ha adoptado hoy generalmente estas ideas, pudiéndose tener por demostrada la hipótesis de que la radiacion del calor consiste en la propagacion del movimiento ondulatorio del éter, que llena todo el espacio, el espacio vacío de materia ponderable, así como los intervalos moleculares de los cuerpos sólidos, líquidos ó gaseosos. De esta suerte se ha llegado á considerar tambien el calor contenido en los cuerpos como emanado de vibraciones. Pero ¿cómo tiene lugar este movimiento? ¿Es peculiar de los átomos ó de las moléculas, es decir, de los grupos de átomos que constituyen los cuerpos, ó pertenece más bien al éter contenido en los espacios intermoleculares? ¿Es, por último, comun á este éter y á las moléculas?

Segun Redtenbacher, las moléculas y los átomos atraen las partículas de éter que se repelen mutuamente; bajo la influencia de estas acciones opuestas, el éter forma una especie de atmósfera alrededor de cada átomo ó de cada molécula, y esta envolvente constituye con su núcleo un todo individual, al que da el nombre de *dinamida.* Para dicho físico «el movimiento calorífico consiste en cierto movimiento radial de las envolventes etéreas que rodean los átomos de los cuerpos ó de las moléculas, al contraerse ó dilatarse alternativamente. Cuando estas envolventes se hallan en reposo, los cuerpos están enteramente frios; tienen un volúmen determinado cuando hay equilibrio entre las acciones recíprocas de las *dinamidas;* pero cuando las fuerzas repulsivas predominan, la reunion de las *dinamidas* necesita una envolvente sólida. Este último caso corresponde al estado gaseoso, y el primero al sólido ó al líquido; en el estado líquido las *dinamidas* pueden correrse unas sobre otras sin alterar sus distancias respectivas.»

Como se ve, el físico cuya teoría acabamos de mencionar hace desempeñar un papel importante al éter intermolecular en la produccion de los fenómenos caloríficos. Clausius, uno de los sabios contemporáneos que con mayor acierto han desarrollado la nueva teoría del calor, hace intervenir solamente las moléculas materiales de los cuerpos: para él consiste el calor en el movimiento de estas moléculas, y admite que no es el mismo en los sólidos que en los líquidos ó en los gases. En su concepto, «las moléculas oscilan en los sólidos alrededor de ciertas posiciones de equilibrio por efecto de la influencia de fuerzas recíprocas. Además de los movimientos oscilatorios rectilíneos, las moléculas pueden tener otros de rotacion oscilatorios alrededor de sus centros de gravedad, pudiendo haber asimismo movimientos en sus partes constitutivas, es decir, en sus átomos.

»En los líquidos, hay movimiento de oscilacion, de rotacion y de traslacion; la fuerza viva no es bastante grande, relativamente á las atracciones recíprocas de las moléculas, para separarlas enteramente unas de otras: éstas conservan tambien un volúmen determinado, áun cuando no haya presion exterior.

»En los gases, las moléculas salen totalmente de sus esferas de atraccion mutua; se mueven en línea recta con arreglo á las leyes ordinarias, y tienen un movimiento de rotacion, siendo probable que los átomos oscilen tambien en las moléculas gaseosas.»

Si las leyes del calor radiante, comprobadas experimentalmente, han inducido á los físicos á admitir la identidad de causa para el calor y para la luz y á considerar en consecuencia el calor como un modo de movimiento, ya de la materia ponderable ó bien del éter, otros hechos no menos significativos han militado en favor

de la misma hipótesis. Veíase hacia dos siglos que el calor desarrollado por la combustion del carbon producia la fuerza expansiva del vapor de agua y que este vapor, distribuido convenientemente, ponia en movimiento las máquinas, es decir, la trasformacion del calor en fuerza mecánica. Por otra parte, los experimentos de Rumford, vislumbrados ya por Boyle, segun más arriba hemos visto, ponian de manifiesto una trasformacion inversa, ó sea la fuerza mecánica produciendo calor. Para terminar la demostracion, restaba tan sólo probar que una cantidad dada de calor consumido produce siempre la misma cantidad de movimiento, y recíprocamente, que á un trabajo mecánico dado y destruido corresponde siempre igual número de calorias. Procuremos dar una idea del modo cómo se ha resuelto este problema y cómo su solucion ha tenido por consecuencia la nueva teoría del calor.

Pero ante todo, ocupémonos con algunos detalles de los experimentos que demuestran cómo pueden producir calor las acciones mecánicas.

III

EQUIVALENCIA DEL CALOR Y DEL TRABAJO MECÁNICO

Los experimentos que Rumford hizo en 1798 para demostrar que la enorme produccion del calor debido al frotamiento de un taladro contra el fondo de un cilindro metálico no podia explicarse atribuyéndola á una disminucion del calor específico del bronce reducido á limadura, eran ya decisivas para destruir la hipótesis de la materialidad del calórico. Las de Davy, que tambien hemos citado, lo fueron mucho más.

Por otra parte, para producir calor, no se necesita que haya division ó alteracion alguna en las superficies frotadas, y lo que decimos aquí del frotamiento es aplicable á cualquiera otra accion mecánica. Cuando una bala de fusil ó de cañon dan contra un cuerpo duro, como una placa blindada, la trasformacion de la fuerza viva en calor es bastante grande para que la bala de fusil aplastada por el choque conserve huellas de fusion y la de cañon se caliente hasta el rojo.

Cuando un cuerpo cae desde cierta altura y da en el suelo, resulta una destruccion de movimiento, ó más bien la trasformacion de este movimiento en calor (1). Esto es cierto lo mismo para los líquidos que para los sólidos; el experimento siguiente, que copiamos de una obra de M. Cazin, da un medio ingenioso de comprobar este hecho:

«A tres ó cuatro metros de altura se coloca una vasija con mercurio, cerrada con una llave provista de una palanca para poder abrirla y

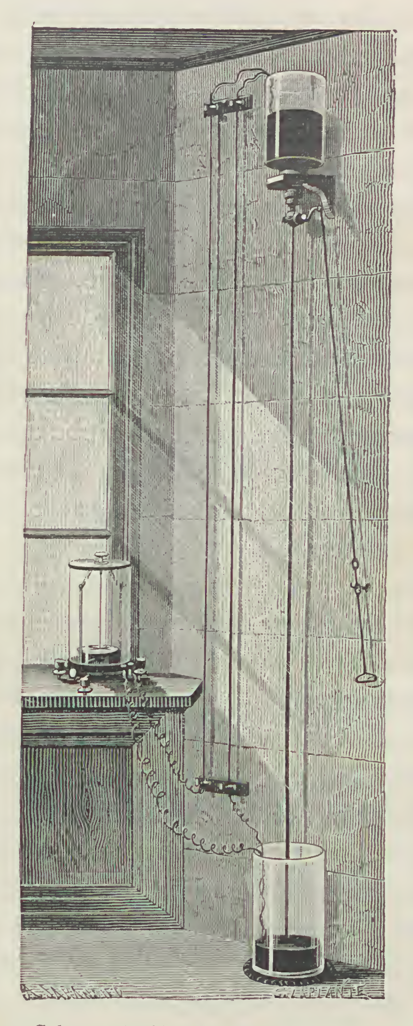


Fig. 156.—Calor producido por la caida de un chorro líquido

cerrarla fácilmente sin necesidad de elevarse hasta dicha altura. En la misma vertical y debajo de la vasija hay otra de hierro delgado que contiene tambien mercurio (fig. 156). Se establece un circuito termo-eléctrico por medio de dos empalmes que penetran respectivamente en el mercurio de cada una de las vasijas y de un galvanómetro. Hay que cerciorarse ante

(1) Cuando el cuerpo y el plano en que cae son elásticos, por ejemplo una bola de billar sobre una placa de mármol bruñido, el movimiento no se destruye hasta que pasa algun tiempo. La bola rebota, y si la elasticidad del marfil y la del mármol fuesen perfectas, saltaria hasta la altura desde la que ha caido, y el movimiento podria continuar indefinidamente. Este caso ideal supone además que el medio no es resistente. En realidad el fenómeno es más complejo. Sábe-

todo, por la posicion de la aguja del galvanómetro, de la igualdad de temperatura de las dos vasijas, y si no la hay, se establece. Abrese luégo la llave; el mercurio cae en la vasija inferior y pierde en ella la velocidad que habia adquirido en la caida, sin producir ningun trabajo apreciable. La aguja del galvanómetro se pone al punto en movimiento, indicando que la vasija inferior se caldea gradualmente. Compréndese pues que sea posible medir la elevacion de la temperatura y, con arreglo á las leyes de la física, deducir de ella el número de calorias engendradas.»

Resulta de aquí que el agua de la parte inferior de una cascada debe estar más caliente que la que se escapa de su cúspide; lo cual hace tambien comprender el aserto de los marinos de que despues de una tempestad el agua del mar está más caliente. Si se puede comprobar este aumento de temperatura, debe de consistir sin duda alguna en la agitacion de las olas, en la trasformacion de su movimiento en calor de resultas del choque.

Hemos visto que la compresion desarrolla calor. Sabemos por otra parte que el hielo á 0° se funde y disminuye de volúmen sin que cambie su temperatura, si se le suministra calor. La razon de que en este caso la absorcion de calor no caliente el agua de fusion consiste en que todo este calor se invierte en el trabajo de contraccion. Pero si, segun hace observar M. Berbin, «suministramos este trabajo con una compresion exterior, el calor necesario para la fusion será menor, y el hielo podrá derretirse á — 0°. Así pues, el punto de fusion del hielo debe bajar por efecto de la compresion, y lo propio sucederá con todos los cuerpos que se dilaten al solidificarse. Lo contrario sucederá con los que se contraen, que son los más numerosos.» En el capítulo VII hemos descrito los experimentos que confirman la exactitud de esta explicacion.

---

se que no hay cuerpo alguno de elasticidad absoluta, ni medio que no ofrezca alguna resistencia, por cuanto no se puede efectuar el vacío absoluto. Por consiguiente, el movimiento visible de la bola acaba por destruirse comunicándose á las moléculas de los cuerpos que chocan entre sí y luégo á las del aire ambiente, y trasformándose en ondulaciones sonoras y probablemente en parte en calor. Sobre un cuerpo blando, la fuerza viva del cuerpo, de una bala de plomo por ejemplo, desaparece casi al punto enteramente; pero se manifiesta un nuevo fenómeno, el de una elevacion sensible de la temperatura de la bala.

En el fenómeno de las estrellas fugaces y de los bólidos tenemos un interesante ejemplo de la trasformacion del movimiento en calor. Nadie ignora que estos cuerpos extraños á la Tierra penetran en nuestra atmósfera en virtud de su movimiento de traslacion en el espacio, combinado con el doble movimiento de rotacion y traslacion de la Tierra. La velocidad de que están animados en el momento en que ocurre dicha penetracion es á las veces considerable, pudiendo comparársela con las velocidades planetarias y cometarias y llegando hasta á 20 kilómetros por segundo y áun pasando de ellos. Así es que el calor desarrollado es bastante fuerte para dar orígen á la incandescencia de la materia que forma esas masas. De aquí resultan esos rastros de fuego que surcan el cielo y que se apagan muy luégo, ya porque el cuerpo haya sufrido una combustion completa, ó ya porque sólo atraviesa la atmósfera y continúa su marcha por el espacio, ó ya en fin, si se trata de una masa sólida, porque no habiéndola podido penetrar el calor por completo, sólo se haya puesto incandescente una delgada capa. Los fragmentos de bólido de superficie vitrificada y fundida, recogidos cuando aún estaban calientes, son otros tantos testimonios auténticos de la realidad de esta última hipótesis.

Para explicar la elevada temperatura á que llegan las estrellas fugaces y los bólidos en su paso por las altas capas del aire, han supuesto unos físicos que el frotamiento era la causa del calor desarrollado, atribuyéndolo otros á la compresion. Helmholtz admite la primera explicacion, diciendo en su *Tratado elemental de la trasformacion de las fuerzas naturales:* «La incandescencia y la elevada temperatura que conservan algunos aerolitos en los primeros instantes que siguen á su caida, se explican hace tiempo por su frotamiento. En efecto, bastaria una velocidad de unos 1000 metros por segundo para elevar á 1000 grados la temperatura del hierro meteórico y hacerle luminoso, si él solo absorbiera todo el calor emanado del frotamiento.»

En su *Memoria sobre la expansion de los gases* prueba Regnault con una serie de experimentos que «cuando circula un gas, áun con grandísima velocidad, por un espacio de paredes

muy dilatadas, no hay desprendimiento perceptible de calor que se pueda atribuir al roce de las moléculas gaseosas sobre dichas paredes.»

«Esta conclusion, añade, está en oposicion con las ideas generalmente admitidas, pudiendo citar muchos hechos que parecen contradecirla. Indicaré los más importantes.

»Un proyectil que atraviesa el aire con gran velocidad se calienta mucho. Atribúyese esta circunstancia al calor desprendido por el frotamiento del proyectil contra las moléculas del aire por él atravesado.

»Los bólidos cruzan nuestra atmósfera con velocidad extraordinaria; se calientan hasta ponerse incandescentes, hasta fundirse del todo, ó únicamente en su superficie. Atribúyese tambien este hecho al calor desprendido por la friccion contra las moléculas gaseosas.

»Creo que en ambos casos el desprendimiento de calor procede de otra causa, y que únicamente dimana *del calor desarrollado por la compresion del aire.*»

Para justificar su opinion, el eminente físico da cuenta en los siguientes términos del modo como ocurren las cosas en su concepto: «Cuando un móvil atraviesa el aire con una velocidad mayor que la del sonido, la elasticidad del aire queda anulada en sus efectos, y la compresion producida por el móvil no tiene tiempo de llegar á las capas contiguas ántes que estas hayan sido comprimidas á su vez por el móvil. A consecuencia de esta inercia, el aire resulta comprimido como podria estarlo en un eslabon de aire. El calor procedente de esta compresion pasará en gran parte al móvil, elevando su temperatura. La expansion del aire que produce frio no influirá en el móvil, porque no tendrá lugar sino cuando este haya pasado. Así pues, en mi concepto, el móvil marchando con la misma velocidad, recogerá siempre el calor que desprende al comprimir el aire, y no sufrirá el enfriamiento producido por la expansion subsiguiente de las capas de aire que acaba de atravesar.

»Aparte de esto es evidente que la compresion del aire será tanto más enérgica cuanto mayor sea la velocidad de que esté dotado el móvil; la temperatura de este subirá hasta que llegue á igualar á la que adquiere una capa de aire que sufre instantáneamente la misma compresion en un eslabon de aire. Así se explica muy bien la elevadísima temperatura que adquiere un bólido al atravesar nuestra atmósfera con una velocidad mucho más considerable que la de propagacion del sonido.

»Un móvil que cruce el aire con velocidad menor que la del sonido adquirirá un caldeo del mismo género, pero más débil. Aun en este caso, el móvil sufrirá la influencia del calor desprendido por la compresion más bien que la del absorbido por la expansion. Ambos efectos se compensarán sensiblemente cuando la velocidad del móvil sea muy escasa (1).»

Si la compresion desarrolla calor, consiste en que necesita consumir fuerza viva, en que se destruye cierta cantidad de trabajo. Por el contrario, la dilatacion de un gas origina un descenso de temperatura que corresponde á una produccion de trabajo ó de fuerza viva. Gay-Lussac ha demostrado con un experimento célebre que las variaciones termométricas que resultan de una compresion y de una dilatacion iguales de un gas son iguales á su vez. Valíase al efecto de dos grandes redomas reunidas por un tubo provisto de una llave. Haciendo un vacío parcial en una de ellas, y aguardando luégo que la temperatura fuese uniforme en ambas redomas, abria la llave. El experimento revelaba una elevacion de temperatura en la primera y otra igual en la segunda. Joule ha repetido el experimento haciendo un vacío tan completo como pudo en un recipiente metálico A (figura 157), y comprimiendo en un recipiente semejante y de la misma capacidad B, aire atmosférico á 22 atmósferas. Introducia ambos recipientes en una vasija llena de agua, y en seguida abria la llave de comunicacion. El gas comprimido en B se precipitaba en A duplicando su volúmen. Pero los termómetros más delica-

(1) Más adelante, el sabio autor de la Memoria explica de este modo la razon de estos hechos de experiencia: «En mi opinion, dice, la friccion de dos cuerpos no desprende calor sino cuando las moléculas de uno de ellos por lo ménos no están absolutamente libres, es decir, cuando se hallan bajo la influencia de una fuerza cualquiera de agregacion. Segun nuestras observaciones, esta libertad absoluta no debe de existir en realidad sino en los flúidos inmateriales, como el éter, que trasmite las vibraciones luminosas. No es perfecta en nuestros gases, y sólo por esto el movimiento de un gas á lo largo de una pared sólida debe desprender cierta cantidad de calor que resulta únicamente de la trasformacion en calor de la pérdida de fuerza viva sufrida por las moléculas para vencer sus resistencias interiores. Mis experimentos prueban que este calor es tan escaso con respecto al aire atmosférico, que no podemos apreciarlo con nuestros medios de observacion.»

dos, metidos en el agua que bañaba las vasijas, no marcaban en el momento de abrir la llave ninguna variacion de temperatura; lo cual consistia, conforme observa Verdet justamente, en que al precipitarse el gas comprimido en el recipiente vacío, «no ha encontrado otra resistencia que la que le ofrece la insignificante cantidad de aire que una buena máquina neumática no puede extraer. Así pues, aunque se reduzca la fuerza elástica del gas de 22 atmósferas á 11, no se ha efectuado ningun trabajo exterior. Tampoco se ha desarrollado ninguna fuerza viva apreciable, puesto que, tanto al principio como al fin del experimento, todas las partes del aparato y el gas contenido en él han permanecido en reposo. Conforme á lo indicado por la teoría, no ha habido ninguna absorcion de calor.» Tal es en efecto el resultado definitivo, pero analizando más completamente lo que ocurre, vese fácilmente que el aire comprimido del recipiente B comunica fuerza viva, miéntras dura el experimento, al aire que pasa á A; por consiguiente, este se enfria. Esta fuerza viva queda destruida en breve, ya á consecuencia del frotamiento recíproco de las moléculas de aire, ó ya por efecto de su choque contra las paredes del aparato, resultando de aquí un desprendimiento de calor precisamente igual á la absorcion que se verifica en B. Los dos efectos opuestos se compensan, lo cual explica la constancia de la temperatura del agua de la vasija que rodea los recipientes.

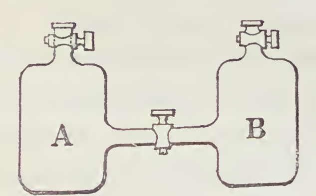


Fig. 157.—Experimento de Gay-Lussac y de Joule sobre la dilatacion de los gases

Tyndall ha presentado por ingenioso modo el doble fenómeno del enfriamiento causado por la dilatacion del aire y de la elevacion de la temperatura que resulta de la destruccion de un trabajo exterior. En el primer experimento se valia de un cubo metálico provisto de un orificio de llave que contenia aire comprimido durante un espacio de tiempo lo suficientemente largo para que adquiriese la temperatura del aire ambiente. Abriendo la llave, el aire se escapa con violencia al exterior. Como es el mismo gas el que suministra la fuerza necesaria para esta expulsion, se enfria, empleando así su propio calor en producir trabajo, lo que se comprueba presentando á la corriente la cara de una pila termo-eléctrica. La desviacion de la aguja del galvanómetro indica un descenso de temperatura.

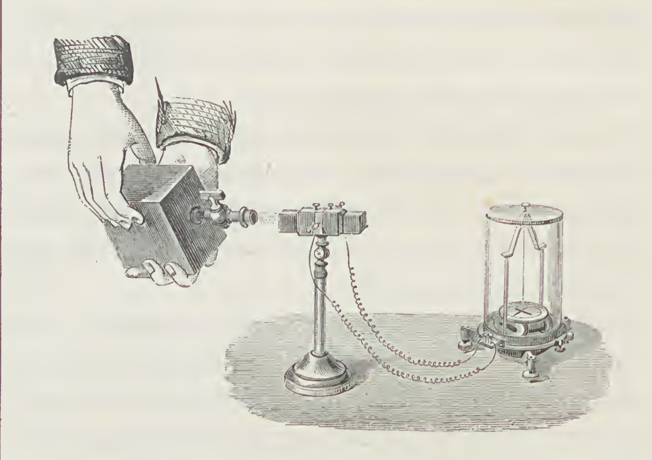


Fig. 158.—Experimento de Tyndall. Calor absorbido por el trabajo de un gas que se dilata

Si se comprime el aire de un fuelle empleando al efecto la fuerza muscular de las manos, es decir, si se expulsa el aire que contiene mediante un trabajo mecánico exterior, la destruccion de este trabajo dará lugar á una produccion de calor. En efecto, la experiencia demuestra en este caso que la aguja del galvanómetro se desvia en sentido contrario, indicando una elevacion de temperatura de la cara de la pila termo-eléctrica (fig. 159).

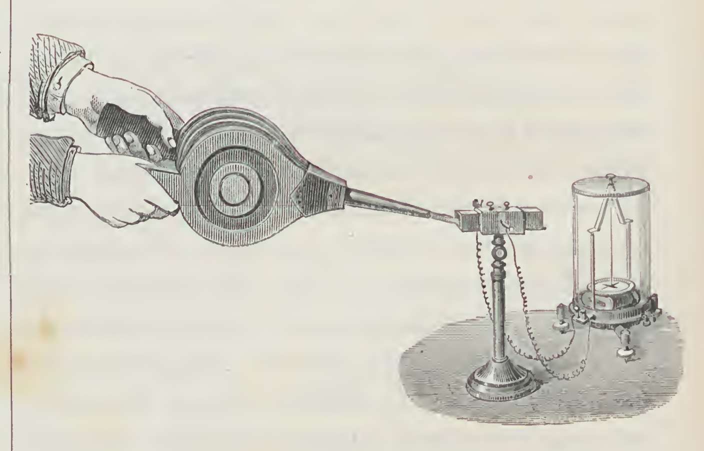


Fig. 159.—Experimento de Tyndall. Calor desarrollado por una destruccion de trabajo

Citemos otro ejemplo relativo á un cuerpo sólido. Una tira de cautchuc se calienta al estirarla, lo cual se conoce fácilmente aplicando la tira á los labios. ¿Cuál es la causa de esta produccion de calor? Hirn ha demostrado que la densidad del cautchuc aumenta cuando se le estira; por consiguiente, la compresion engendra el calor de la tira.

Terminemos la enumeracion de estos ejemplos de la trasformacion del trabajo mecánico en calor recordando un bello experimento de Leon Foucault. En el tomo III del MUNDO FÍSICO hemos visto en qué consiste este experimento. Entre los polos de un electro-iman se hace girar un disco de bronce, por medio de un manubrio, con una velocidad de 150 á 200 vueltas por segundo. Supongamos que ántes de animar el electro-iman se imprima esta velocidad al disco; una vez obtenida, se hace pasar la corriente de seis pares Bunsen á los brazos del electro-iman fijo. Al punto nacen corrientes inducidas en el disco móvil y por su reaccion sobre la corriente de las bobinas del electro-iman se oponen al movimiento y lo hacen parar en algunos segundos, «como si, segun la expresion de Foucault, se hubiera aplicado

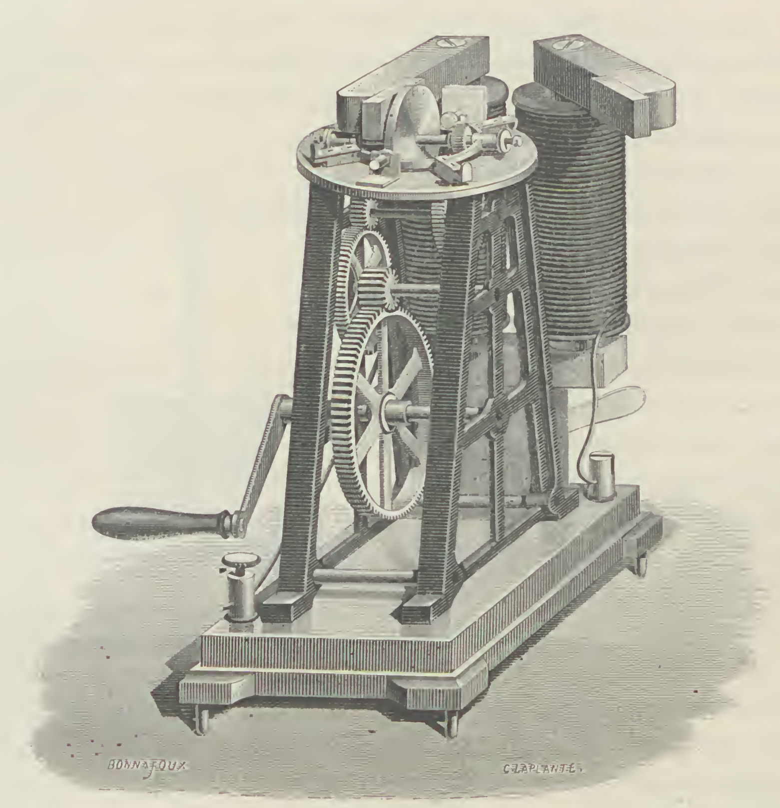


Fig. 160.—Experimento de Leon Foucault

al móvil un freno invisible.» Las corrientes inducidas cesan ántes de detenerse el disco, pero esta destruccion de movimiento ha producido calor, cuya existencia se puede comprobar con instrumentos termo-eléctricos. Se puede dar otra forma al experimento. Primeramente se hace pasar la corriente por el electro-iman, y luégo se procura hacer girar el disco empujando al efecto el manubrio; pero se experimenta gran resistencia; el esfuerzo que se ha de hacer para continuar el movimiento del disco algunos minutos tan sólo, es bastante considerable para que la trasformacion del trabajo destruido en calor eleve la temperatura del disco de 20 á 35 grados sobre la temperatura del aire. Reduciendo la pila á dos pares, y prolongando el movimiento por espacio de dos minutos, Foucault ha visto elevarse hasta 60 grados la temperatura de un disco plano de cobre rojo. Como se ve, este es un ejemplo evidente de la trasformacion del trabajo mecánico en calor. La fuerza viva de este trabajo, aniquilada en apariencia, se comunica en realidad á las moléculas del disco, y de su forma visible, pasa á la forma invisible de trabajo de oscilacion y de disgregacion, segun la frase de Clausius.

Los ejemplos de la trasformacion del trabajo en calor y vice-versa, que hemos reproducido en este artículo, bastaban para hacer probable en alto grado la teoría que define el calor como un modo de movimiento. Mas para que adquiriese un carácter positivo de certidumbre, menester era dar un paso más; determinar por la experiencia los números que marcan, ya la cantidad de trabajo creada por el consumo de una unidad de calor ó de una *caloria*, ó bien la can-

tidad de calorias necesarias para producir una unidad de trabajo. En una palabra, era preciso encontrar el *equivalente mecánico del calor*, ó bien el *equivalente calorífico del trabajo.*

IV

MEDIDA DEL EQUIVALENTE MECÁNICO DEL CALOR

Al doctor Julio Roberto Mayer de Heilbronn le cabe el honor de haber enunciado por vez primera y de un modo exacto el principio de la equivalencia del trabajo y del calor, á saber: que el calor producido por la realizacion de un trabajo cualquiera es proporcional al trabajo invertido, ó lo que es lo mismo, que una de estas cantidades puede medirse por la otra. En una Memoria titulada *Observaciones sobre las fuerzas de la naturaleza inanimada* y publicada en 1842, establece estos principios y calcula el equivalente mecánico del calor, valuándolo en 365 kilográmetros. Esta cifra difiere bastante de las averiguaciones ulteriores; pero, segun observa Verdet, la razon de esta diferencia depende de la inexactitud de los valores del coeficiente de dilatacion y del calor específico del aire que á la sazon pasaban por válidos en la ciencia.

Las primeras determinaciones rigorosas del equivalente mecánico del calor se deben al físico inglés Joule, que en el órden cronológico ocupa el tercer lugar (despues de Mayer y del ingeniero danés Colding), pero quizás sea el que más ha hecho para demostrar el nuevo principio y para que se adoptara definitivamente. Entremos en algunos detalles acerca de los experimentos de Joule.

Ponia en una vasija llena de mercurio dos placas de hierro, una fija, y la otra fuertemente unida á la primera con una palanca cargada con un peso, y en seguida imprimia á esta segunda placa un movimiento de rotacion mediante el descenso de un peso. El trabajo necesario para vencer el rozamiento de las placas se valuaba multiplicando el peso por la altura de la caida, y el calor producido, por la elevacion de temperatura del mercurio. Joule deducia de estos experimentos 425 kilográmetros como promedio del valor del equivalente mecánico del calor.

En otro experimento comprimia aire, con una bomba impelente, en una vasija metálica sumergida en el agua de un calorímetro. Despues de dar un número determinado de golpes de émbolo y de llegar la presion del aire á cierto número de atmósferas, observaba la elevacion de temperatura del agua y deducia de ella la cantidad de calor cedida á este líquido. Como el caldeo no dimanaba por completo de la compresion del aire, sino tambien del frotamiento del émbolo, empezaba de nuevo la operacion dejando el recipiente en comunicacion con la atmósfera, es decir, sin comprimir el

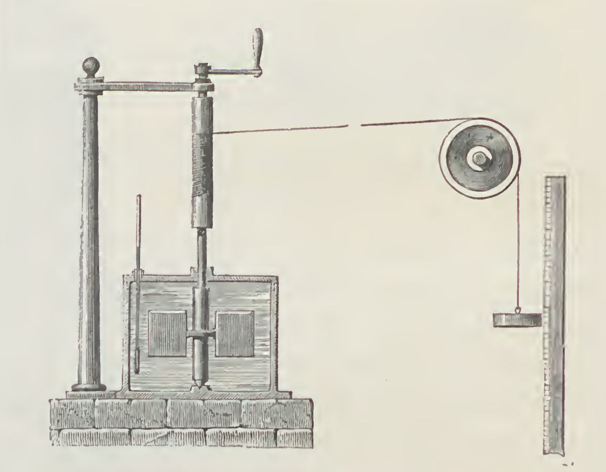


Fig. 161.—Experimento de Joule. Determinacion del equivalente mecánico del calor

aire. El calor producido por esta nueva operacion era el causado por el rozamiento en la anterior. Valiéndose de este método, Joule dedujo 438 kilográmetros como equivalente mecánico del calor.

Este físico utilizó tambien con el mismo objeto el frotamiento entre sólidos y líquidos. Haciendo dar vueltas á una rueda de paletas en agua ó en mercurio (fig. 161), observaba la elevacion de temperatura del líquido, y podia deducir asimismo de ella el número de calorias creadas por el frotamiento. Por otra parte, media fácilmente el trabajo invertido para obtener el movimiento de rotacion, y como este resultaba de la caida de dos pesos enrollados con dos cordones, por un lado al eje de las paletas, y por otro á dos poleas, el trabajo invertido era igual al producto de los dos pesos por la altura de la caida de cada uno de ellos. Joule obtuvo por este método las cifras siguientes:

	Kgm.
Por el frotamiento del laton en el agua. . .	423,92
— del hierro en el mercurio.	424,68

O sea unos 424 kilográmetros por término medio.

Favre ha determinado el equivalente mecánico del calor estudiando el calor desarrollado por el rozamiento del acero sobre sí mismo. El aparato de rozamiento estaba contenido en el calorímetro de mercurio de Favre y Silbermann, y ya hemos visto cómo se puede medir entónces el calor producido. En cuanto al trabajo consumido por el rozamiento, se media por la caida del peso motor del aparato. El promedio del valor del equivalente mecánico determinado de esta suerte era de 413 kilográmetros, número algo inferior al de Joule.

M. Hirn de Colmar ha efectuado muchas series de investigaciones análogas, basadas la primera en el frotamiento del agua, la segunda en la salida del agua á fuertes presiones, la tercera en el aplastamiento del plomo por el choque del ariete, y por fin, la cuarta en el descenso de temperatura originada por la expansion del aire. Los valores del equivalente mecánico del calor deducidos de estas investigaciones varian entre 433 y 424,5 kilográmetros, aproximándose mucho á los resultados obtenidos por Joule. El mismo físico ha hecho asimismo experimentos de gran interés en la máquina de vapor, los cuales prueban que el calor perdido por el vapor, al pasar de la caldera por el cilindro al condensador, es proporcional al trabajo exterior efectuado por la máquina. Conociendo la cantidad de agua vaporizada en la caldera y enviada al cilindro, su tension y su temperatura, M. Hirn pudo calcular la cantidad de calor que contenia, valiéndose de las tablas de Régnault. Midiendo por otra parte la cantidad y la temperatura del vapor condensado á su salida del cilindro, así como las del agua inyectada en el condensador, obtuvo tambien la medida del calor que tenia aún el vapor en tal momento. Aparte de esto, M. Hirn no tan sólo ha medido el trabajo útil de la máquina, sino tambien el absorbido por las resistencias pasivas, en una palabra, el trabajo total producido por el vapor en el émbolo del cilindro. «Los experimentos de M. Hirn, bien interpretados, dice Verdet, demuestran que el vapor lleva al condensador ménos calor del que saca de la caldera, y que el calor consumido en el interior de la máquina es proporcional al trabajo efectivo del vapor. La relacion entre ambas cantidades es una nueva determinacion del equivalente mecánico del calor, que se aproxima á las anteriores determinaciones de Joule y Favre. En efecto, si los resultados individuales que se pueden deducir de los experimentos de M. Hirn oscilan entre límites bastante extensos, su valor medio es el número 413, precisamente igual al hallado por M. Favre en sus experimentos sobre el rozamiento del acero, y no muy diferentes de los que M. Joule ha dado á conocer.»

Nos limitaremos á esta ligera mencion de algunos de los experimentos que han servido directamente para determinar el equivalente mecánico del calor. El promedio adoptado hoy más generalmente es 424 ó 425 kilográmetros, lo cual significa, tomando este último número, que consumiendo el calor necesario para elevar un grado centígrado la temperatura de un kilógramo de agua, ó una *caloria*, se produce una cantidad de trabajo bastante para elevar un kilógramo á la altura de 425 metros, ó 425 kilógramos á la de un metro. Del propio modo, el trabajo de 425 kilográmetros convertido en calor produciria una caloria, y recíprocamente, el *equivalente calorífico de la unidad de trabajo* es igual á $\frac{1}{425}$ de caloria.

El cuadro siguiente en el que se resumen las investigaciones más importantes sobre este asunto, dará al propio tiempo una idea de los varios métodos que han servido para la solucion del problema:

Fenómenos que han servido para determinar el equivalente mecánico del calor	Nombres de los físicos experimentadores	Valor del equivalente mecánico
Propiedades generales del aire	Mayer, Regnault. Clausius, Moll y Van Beck.	426
Frotamiento del agua por una rueda de paletas	Joule	424
Frotamiento del mercurio por una rueda de paletas	Joule	425
Frotamiento del mercurio por una placa de hierro	Joule	426
Frotamiento del acero por el acero	Favre	413
Experimentos en la máquina de vapor	Hirn	413

Fenómenos que han servido para determinar el equivalente mecánico del calor	Nombres de los físicos experimentadores	Valor del equivalente mecánico
Calor de las corrientes inducidas.	Joule..	452
Calor desarrollado por una máquina electro-magnética. . .	Favre..	443
Calor total desarrollado en el circuito de una pila de Daniell.	Weber, Joule.	420
Calor desarrollado en un hilo metálico atravesado por una corriente.	Quintus Icilius.	400
Nuevos experimentos en la máquina de vapor.	Hirn..	420 á 432

Creemos inútil insistir en lo importante que es conocer el elemento cuyo valor acabamos de dar con toda la aproximacion que hoy permiten los métodos físicos y los procedimientos de medicion. Por el concepto teórico, ha resultado de aquí una renovacion completa de la ciencia del calor. Como no nos incumbe el dar aquí una idea de ella, remitimos al lector á las obras especiales sobre el asunto, pero sí demostraremos con uno ó dos ejemplos la nueva luz que se ha hecho sobre los fenómenos que quedan descritos en los capítulos anteriores. Véase cómo interpreta M. Bertin, en su *Dictámen sobre los progresos de la termodinámica*, los cambios de estado del agua, su fusion y su vaporizacion: «Los cambios de estado nos ofrecen un curioso ejemplo de la trasformacion del vapor en trabajo molecular. Cuando se comunica calor al hielo á 0°, no se le calienta, sino que se le derrite. Aquí la fuerza viva comunicada se trasforma enteramente en trabajo molecular. Las moléculas que estaban orientadas en el hielo se separan para agruparse de todos los modos posibles. Por lo general, en esta nueva colocacion, que constituye el estado líquido, las moléculas están más desviadas que en el sólido, y el cuerpo al fundirse se dilata; pero hay excepciones, y en especial por lo que respecta al hielo que al fundirse disminuye de volúmen. Estas excepciones son seguramente muy curiosas, pero no tienen nada que deba extrañarnos. No podemos decir *à priori* cuál será el signo del trabajo de disgregacion que se llama *fusion;* tampoco podemos decir si las moléculas se desvian ó se acercan; lo único cierto es que cambian de sitio, y cualquiera que sea el sentido de este cambio, constituye un trabajo molecular que absorbe una cantidad de fuerza viva ó de calor: y á esto es á lo que se llama *calor latente*. La experiencia nos enseña que el calor latente del hielo es de 79,25 calorias. De aquí deducimos que la disgregacion de las moléculas del hielo y la nueva agrupacion que las constituye en estado líquido son una operacion mecánica que, cuando se efectúa en un kilógramo de hielo, requiere un trabajo de $425 \times 79,25 = 33,681$ kilográmetros.

Cuando se calienta agua de 0° á 100°, sólo se dilata la vigésimatercia parte de su volúmen; entónces repele la presion atmosférica efectuando un trabajo externo poco considerable, por cuanto no llega á 0,5 de kilográmetro por litro de agua. Mas, tan luégo como el agua ha llegado á 100°, cualquier adicion de calor no la calienta ya, sino que la trasforma en vapor haciéndola adquirir un volúmen 1700 veces mayor que el suyo propio. Aquí el trabajo exterior es considerable, porque es siempre igual al producto de la presion atmosférica por el aumento de volúmen, y este producto, calculado por un litro de agua, es de 17,000 kilográmetros. Este trabajo exterior absorbe ya por su parte 40 calorias; pero hay además un trabajo molecular que debe de ser muy grande, porque todo este trabajo, así el externo como el interno, absorbe 537 calorias por kilógramo de agua, siendo esto lo que se llama *calor latente* del vapor de agua. En realidad, es la fuerza viva de 537 calorias la que se ha trasformado en dos clases de trabajo, habiéndose invertido 40 de ellas en repeler la presion atmosférica produciendo un trabajo de 17,000 kilográmetros, y las 497 restantes en separar las moléculas del vapor de agua produciendo un trabajo de 211,225 kilográmetros.

«Hé aquí, añade M. Bertin, el más bello ejemplo de la trasformacion de la fuerza viva del calor en trabajo. El agua á 100° es agua en cierto estado vibratorio, cuya fuerza viva la indica la temperatura: está en contacto con un foco más caliente, ó cuya fuerza viva es mayor, y sin embargo la fuerza viva del movimiento vibratorio primitivo no ha aumentado, por cuanto la temperatura ha permanecido estacionada. ¿Qué ha sido pues del movimiento que el foco ha comunicado al agua, de la fuerza viva

que ha introducido en ella? Se ha trasformado en trabajo y el agua se ha vaporizado. En el acto de la vaporizacion, el trabajo exterior no es despreciable, pero sin embargo es menor que el molecular. En la fusion, aquel trabajo es demasiado reducido para que sea necesario tenerlo en cuenta, y sí sólo tomar en consideracion el trabajo interno. Por el contrario, en la dilatacion de los gases, todo induce á creer que el trabajo interno es el despreciable. ¿Qué debe deducirse de esto? Que el trabajo interno es muy variable, y que por lo general no es posible determinarlo directamente.

» Hay aquí una dificultad considerable que se presenta casi siempre que se quiere determinar el equivalente mecánico del calor; porque en todos los experimentos hechos con tal objeto, sólo se puede medir el calor y el trabajo exterior: el trabajo molecular se desconoce siempre. Hay un medio de obviar esta dificultad, medio que debemos á Sadi Carnot: consiste en hacer pasar el cuerpo por una serie de cambios que lo vuelven á su estado primitivo, á lo cual se da el nombre de *ciclo cerrado*. Es evidente que, en este caso, el trabajo definitivo es nulo, y que por esto mismo resulta eliminado, siendo permitido, solamente en este caso, comparar el calor producido con el trabajo exterior destruido. Así pues, en todo experimento dispuesto para determinar los elementos de esta comparacion es preciso que no sobrevenga ningun cambio permanente en el estado del cuerpo, ó en otros términos, que este cuerpo vuelva á encontrarse exactamente en su estado primitivo al terminar las operaciones á que se le haya sometido.»

V

POTENCIA MECÁNICA DEL CALOR SOLAR

El principio de la equivalencia del calor y del trabajo mecánico, así como la determinacion muy aproximada del valor numérico del equivalente, han permitido abordar ciertos problemas de física celeste y terrestre sobre los cuales sólo se tenian ántes datos sumamente vagos é hipotéticos.

Hemos visto cómo se podia valuar en calorias la energía de las radiaciones solares; hemos expuesto los cálculos mediante los cuales se puede conocer el peso del agua que tan poderoso foco pondria en ebullicion, la capa de hielo que fundiria en la superficie del Sol en el solo intervalo de un dia, y la que se derretiria en la superficie del globo terráqueo por efecto de la fraccion del calor solar que cae en ella en un año. Ahora podemos decir tambien cuál es la potencia mecánica de ese inmenso foco, calcular la suma de fuerzas que engendraria en la superficie de la Tierra todo el calor que derrama en ella sin cesar, si se convirtiera este calor en trabajo.

Adoptando los resultados de las medidas más recientes que fijan por término medio en 0,002 caloria la cantidad de calor dirigida en un minuto sobre cada centímetro cuadrado de la superficie límite de la atmósfera terrestre, vemos que en un año cada metro cuadrado de la superficie de la Tierra recibe 2.547,300 calorias; ó sea más de 25,000 millones de calorias por hectárea, es decir 10.826,025.000,000 de kilográmetros. Así pues, al ejercer el Sol su radiacion calorífica sobre la superficie de una hectárea, desarrolla de mil diferentes modos una potencia que equivale al trabajo continuo de 4,584 caballos de vapor, trabajo que en la Tierra entera es de 233.784,000.000,000 caballos.

Resulta pues que la radiacion solar únicamente, equivale para nuestro planeta á 583,000 millones de máquinas, cada cual de una fuerza efectiva de 400 caballos, que trabajaran sin cesar noche y dia! A decir verdad, toda esta potencia dista mucho de trasformarse en trabajo. Una parte de ella se invierte en caldear la costra terrestre hasta cierta profundidad; pero como el suelo y la atmósfera radian al espacio, y el globo terráqueo no parece perder ni ganar desde el punto de vista de la temperatura media, á lo ménos durante largos períodos de años, puede considerarse toda esta fraccion de la radiacion del Sol como si mantuviera el equilibrio de temperatura en el planeta.

Otra parte se trasforma en movimientos moleculares, en acciones y reacciones químicas, que son el foco del que la vida de los vegetales y de los animales saca sin cesar de qué perpetuarse y mantenerse. El calor que parece tan á propósito para estos séres no es otra cosa sino una emanacion del del foco comun. «De aquí se desprende, dice Tyndall con este motivo, que todos nosotros somos, no en sentido

poético, sino puramente mecánico, hijos del Sol.»

Por último, la radiacion calorífica de dicho astro contribuye á producir la mayor parte de los fenómenos de movimiento, perceptibles á la vista, que ocurren continuamente en el suelo, en el aire y en las aguas, lo cual es fácil de demostrar.

Y en efecto, ¿de qué causa dimanan las corrientes aéreas, los movimientos regulares ó irregulares de que están animadas las masas gaseosas de la atmósfera? Del calor solar, que si directamente caldea poco las capas atmosféricas, en cambio cayendo á plomo sobre el suelo de las regiones tropicales, eleva su temperatura mucho más que en las otras latitudes. Hallándose en contacto con el suelo las capas de aire más bajas, se caldean, se dilatan, y el aire enrarecido de que se componen sube para desparramarse al norte y al sur hácia las latitudes más altas, al paso que las reemplazan otras masas de aire más frias procedentes de las regiones templadas y polares. De este modo nacen los vientos regulares conocidos con el nombre



Movimientos generales de los vientos en el globo

de alisios, cuya direccion la modifica en cierto modo el movimiento de rotacion de la Tierra.

De este modo se establecen unos rios aéreos que corren sin cesar por cada hemisferio del ecuador hácia los polos: uno superior que se dirige hácia el nordeste en el hemisferio boreal y hacia el sudeste en el austral; y otro inferior que tiene una direccion enteramente opuesta, y que por lo tanto sopla del nordeste ó del sudeste. «Así nacen los grandes vientos de nuestra atmósfera, pero materialmente modificados por la distribucion irregular de las tierras y de las aguas. La accion local del calor, del frio y de la evaporacion engendra tambien otros vientos de menor importancia. Los hay producidos por el caldeo del aire en los valles de los Alpes, lanzándose á veces con repentina y destructora violencia al través de las gargantas de las montañas. Hay agradables ráfagas de aire descendente, producidas por la presencia de los glaciares en las alturas. Hay brisas terrestres y marítimas originadas por las variaciones de temperatura del suelo de la ribera durante el dia y la noche. El Sol de la mañana, al caldear la tierra, ocasiona una dislocacion vertical en el aire, compensada por el aire más frio del mar que sopla hácia tierra. De noche, ésta está más fria, á causa de la radiacion, que las aguas del mar, y las condiciones se invierten, pues entónces sopla hácia el mar el aire más frio y pesado de las costas.» (Tyndall.)

Como se ve, todos los vientos tienen por primitivo orígen el calor del Sol que se ejerce desigualmente en las diferentes regiones de la superficie del suelo terrestre segun la posicion del astro, posicion que varía de continuo con la hora del dia y la época del año. La rotacion y la traslacion de la Tierra contribuyen pues, juntamente con la radiacion calorífica, á producir las corrientes atmosféricas. Así se consume

en forma de movimiento sensible una parte de la potencia mécanica que encierran las ondulaciones étereas emanadas del Sol.

Pero no es esto todo. Las alternativas de caldeo y enfriamiento del suelo y de las masas atmosféricas ocasionan ora una evaporacion del agua de los mares, rios y lagos, ora una condensacion del vapor de agua que contiene la atmósfera. Al enfriarse las vesículas que forman las nubes, se reunen formando gotas que caen por su peso en la superficie del suelo, y así tenemos la lluvia. Si se enfrian más, se congelan y caen en forma de nieve, acumulándose principalmente en las cumbres de las montañas. En las altas regiones las nieves forman glaciares. El calor del Sol liquida de nuevo el agua congelada en los campos de nieve y los glaciares; los manantiales y los arroyos bajan por efecto de la gravedad, se reunen con las aguas llovedizas, constituyen los riachuelos y rios, y vuelven así al Océano, de donde las habia hecho salir el calor del Sol.

Así pues, la circulacion de las aguas como la de las masas aéreas, esos movimientos incesantes tan indispensables para la conservacion de la vida en la superficie del globo, sacan la fuerza que les da nacimiento, en parte de la potencia mecánica del calor solar, y en parte de la gravedad de la masa terrestre.

Del propio modo tienen orígen otras corrientes líquidas, las que surcan los mares, desde el ecuador hasta los polos; las temperaturas desiguales dan lugar á dilataciones desiguales y á movimientos ascendentes y descendentes de las capas líquidas; la evaporacion produce un efecto inverso aumentando el grado de salsedumbre en los puntos en que el calor la hace más fuerte, es decir, en las regiones de la zona ecuatorial, resultando de aquí diferencias en la densidad y movimientos ó corrientes que son su consecuencia.

La cantidad de movimiento engendrada así de un modo continuo por el calor solar en la superficie del globo terráqueo es inmensa: no se limita á la circulacion aérea, fluvial y oceánica, ó por lo ménos esta misma circulacion da lugar á modificaciones incesantes en la corteza sólida del globo. Una degradacion lenta y continua de las rocas, de los acarreos de materia, arenas, casquijo, tierras, cambia de año en año, de siglo en siglo, la forma de las riberas, el relieve de las colinas y montañas, siendo tambien la potencia mecánica del calor la causa primera de estas trasformaciones.

La fuerza viva de la radiacion solar sufre tambien otras trasformaciones, aparte de las que acabamos de indicar, y segun veremos, áun cuando sean ménos directamente utilizables en forma de trabajo, no por eso dejan de contribuir á enriquecer á nuestro planeta con un manantial continuo de movimientos de toda clase. Y en efecto, ¿no hemos visto que la luz solar es la que, por su accion sobre las partes verdes de las plantas descompone el gas ácido carbónico del aire, fija el carbono en la sustancia vegetal y elimina el oxígeno? Podemos pues decir que el reino vegetal tiene por principal condicion de su existencia la fuerza viva de las radiaciones solares que absorbe, ya en forma de calor, ó ya en la de luz ó de actividad química. Aparte de esto, la vida animal no podria subsistir sin los vegetales en la superficie de la Tierra, ni por consiguiente la del hombre. Las radiaciones solares son, pues, la causa principal de toda la potencia acumulada en los músculos de los animales y de las razas humanas, y en ellas reside el manantial, renovado incesante y periódicamente, del movimiento, de la potencia, de la vida. Y no tan sólo se aprovechan las generaciones actuales de la prodigiosa cantidad de fuerza que el Sol difunde anualmente sobre la Tierra, en forma de ondulaciones caloríficas, químicas y luminosas, sino que consumen tambien el depósito que han acumulado los siglos. ¿Qué son las capas de hulla sepultadas en la tierra por las evoluciones geológicas sino el producto de la fuerza viva de las radiaciones solares que se ha condensado, millones de años hace, en gigantescas selvas? El carbono procedente de los árboles que constituian estas selvas, trasformado por una especie de destilacion lenta, se aglomeró primero en tejido turboso, luégo en rocas de compacidad creciente, hasta que las capas de detritus vegetales quedaron totalmente trasformadas en lechos de hullas fósiles. Hoy estos preciosos fósiles devuelven al hombre, en las fábricas, en las locomotoras y en las máquinas de los buques de vapor, toda la potencia mecánica contenida en la radiacion solar que ha-

bian acaparado, convertida en luz, en calor y finalmente en fuerza mecánica.

VI

MANTENIMIENTO DE LA RADIACION SOLAR

Otra cuestion que, merced á la nueva teoría del calor, se puede considerar bajo un novísimo aspecto, es la que se refiere, si no al orígen de la potencia viva de la radiacion solar, á lo ménos á su conservacion ó á su mantenimiento en la serie de los tiempos trascurridos, lo propio que en la de los siglos venideros. Como todo consumo de calor y de luz es una pérdida real, una disminucion para el foco del que emanan los rayos, es evidente de todo punto que si no hay algo que mantenga la actividad de la combustion ó de la incandescencia de que la masa solar es foco, llegará un momento en que este foco se extinga completamente, por no haber nada que compense el consumo enorme, consecuencia de su radiacion al espacio, y por disminuir progresivamente la energía de sus radiaciones.

Ante todo, teniendo en cuenta los datos que poseemos acerca de la radiacion solar, ¿puede decirse cuánto baja su temperatura en un año, en un siglo, en un espacio de tiempo cualquiera? Pouillet se ha planteado á sí mismo este problema, pero ha demostrado al propio tiempo que su solucion es indeterminada para nosotros. Para resolverlo, seria preciso conocer dos elementos de la constitucion física del Sol, la conductibilidad de la sustancia de que se compone su globo y su calor específico; pero ignoramos el valor exacto de cada uno de estos elementos, y sólo podemos suponerlo. En la hipótesis de que la conductibilidad sea perfecta y admitiendo que el calor específico del Sol sea 133 veces el del agua, Pouillet ha sacado la consecuencia de que la temperatura del astro debe bajar un centésimo de grado por año ó un grado por siglo, y por consiguiente en 10,000 años el enfriamiento total equivaldria á 100 grados (1).

(1) Ocioso es decir que estas cifras distan sin duda mucho de la verdad. Si la masa del Sol es gaseosa, su calor específico á la presion ordinaria podria compararse con el del hidrógeno, que viene á ser de unos 3,4, número muy inferior á 133. Por otra parte, la elevada temperatura del Sol debe aumentar este calor específico. Finalmente, léjos de ser perfecta su conductibilidad, es probablemente muy escasa, como se ha visto que sucede en general con la de los gases. Con datos tan inciertos, no es posible deducir nada en conclusion, y Pouillet sólo ha pretendido dar una idea del modo cómo podria buscarse la solucion del problema.

Ahora bien ¿se ha enfriado efectivamente el Sol desde los tiempos históricos? Nada prueba, que sepamos, semejante fenómeno en los millares de años de que el hombre ha conservado recuerdo. Quizás llegue un dia en que la historia del pasado de nuestro planeta arroje alguna luz sobre el problema planteado de tal modo; pero no hay que perder de vista que cualquier cambio demostrado de los climas, ó de la temperatura media de la Tierra, puede atribuirse lo mismo á modificaciones terrestres que á cualquier variacion en la intensidad de la radiacion solar, y por lo tanto el problema será siempre muy complejo.

Lo que sí puede afirmarse es que de muchos miles de años á esta parte no se ha notado ninguna disminucion apreciable en esta intensidad; así es que forzosamente debe suponerse ó que el enfriamiento es más lento de lo que exige la solucion, á la verdad hipotética, de Pouillet, ó que el Sol conserva su calor por otros medios cuya naturaleza resta averiguar. Acabamos de ver que en el caso de que no reparase sus pérdidas, se enfriaria 100° en cien siglos; pero esto supone un calor específico enorme, y si este calor no es mayor que el del agua, en el mismo espacio de tiempo no se enfriaria 100° sino 14000°; es decir, su radiacion quedaria totalmente extinguida.

«Ninguna de las combustiones, ninguna de las afinidades químicas que conocemos, dice Tyndall, podria mantener la radiacion solar. La energía química de estas sustancias seria demasiado débil, y se disiparian rápidamente en el espacio. Si el Sol fuese una masa de hulla, y se le dotara de la suficiente cantidad de oxígeno para hacerle capaz de arder hasta el grado que exige la radiacion medida, se consumiria enteramente al cabo de 5000 años.»

La cuestion queda pues en pié, ignorándose todavía cómo se alimenta ese hogar prodigiosamente intenso, cuya masa, por enorme que sea, no basta para explicar la incandescencia que persiste durante la prolongada serie de siglos, en tanto que se le considere simplemente como un cuerpo cuya combustion no encuentra alimento sino en su propia sustancia.

Varias son las hipótesis que se han propuesto y discutido. Vemos sucintamente cuáles son.

Hase dicho que como el Sol gira sobre su

eje en 25 dias, debe resultar de este movimiento un roce de su superficie contra el medio en que se mueve, y por la trasformacion de este roce, un desprendimiento de calor y de luz. Pero en este caso, ¿cuál es la materia que comprimiria como un freno la periferia del globo solar? ¿El éter? Semejante suposicion es á todas luces inadmisible; porque la accion de este medio se haria sentir con energía mucho mayor en los planetas, cuyo movimiento de rotacion y sobre todo el de traslacion son más rápidos. Aparte de esto, se ha calculado que si toda la fuerza de rotacion del Sol se convirtiese en calor, bastaria para compensar la radiacion más de un siglo; pero tambien se consumiria enteramente en ménos de dos siglos. Hay pues que desechar esta hipótesis, á la vez del todo insuficiente y en contradiccion con las observaciones que de dos siglos á esta parte no indican disminucion alguna en la velocidad de rotacion del astro.

Otra opinion, sostenida brillantemente por Mayer, Waterston y Thomson es la que explica el mantenimiento del calor solar atribuyéndolo á la caida de meteoros en la superficie del Sol. Sir W. Thomson es el que ha desarrollado más completamente esta teoría, cuyo resúmen es el siguiente.

Alrededor del Sol circula ó gravita una multitud de cuerpos: unos, como los planetas, describen órbitas cuyos ejes mayores tienen dimensiones casi invariables, á lo ménos desde los tiempos históricos. Sábese tambien en virtud de la teoría de las perturbaciones recíprocas que ejercen unos sobre otros, que esta invariabilidad debe subsistir por espacio de largas series de siglos, lo cual prueba que el medio en que circulan opone una resistencia casi nula á sus movimientos. Además de los planetas, cuyo número actual pasa de 230, hay una muchedumbre de cometas, millones probablemente, que describen órbitas mucho más alongadas, y cuyas masas, comparativamente muy pequeñas, pueden experimentar una resistencia perceptible por parte del medio en que se mueven. El cometa de Encke, por ejemplo, se acerca visiblemente al Sol á medida que disminuye la duracion de su período, y si esta aceleracion continúa, llegará dia en que el astro, despues de haber descrito una espiral, se precipitará en el abrasador hornillo. Otros corpúsculos, que son en mayor número todavía, circulan constantemente en derredor del astro solar; son los que aparecen por enjambres en ciertas épocas del año y que, rasando la atmósfera de la Tierra con la velocidad de los planetas, se inflaman en ella y á veces caen en su superficie. Esos enjambres, cuyos rastros se han asimilado, cuando no identificado, recientemente con las masas cometarias, parecen describir, los unos curvas parabólicas que indican que vienen á visitar, quizás por vez primera, las regiones solares, y los otros elipses más ó ménos alongadas. Sufriendo poco á poco estas masas, que individualmente son muy pequeñas, la resistencia del medio que acelera el movimiento del cometa de Encke, se acercan al Sol, y reuniéndose en gran número, aumentan con su aglomeracion la resistencia y la densidad de este mismo medio, debiendo producir su acumulacion alrededor del Sol una especie de nebulosa. Tal será sin duda la causa de ese resplandor conocido con el nombre de *luz zodiacal*, cuyo plano coincide poco más ó ménos con el de la eclíptica ó del ecuador solar, y que se extiende á una distancia del astro casi igual á la distancia media de la Tierra.

Toda esta materia, ó mejor dicho, todas estas corrientes de materia meteórica circulan alrededor del foco reflejando su luz; mas al propio tiempo la velocidad de traslacion se acelera poco á poco á causa de sus choques, y de la resistencia que unas y otras oponen á sus propios movimientos, comprendiéndose que de aquí resulte una lluvia incesante de meteoros en la superficie del globo solar.

En el caso de que verdaderamente exista semejante lluvia, basta para proporcionar continuo alimento á la radiacion calorífica y luminosa del Sol. Por una parte, obtiene este así un aumento de sustancia, elementos de combustion agregados á los que posee ya. Por otra, y en esto estriba, segun los autores citados, la verdadera, la principal causa del mantenimiento de la radiacion del Sol, la caida de cada meteoro da orígen, por la simple trasformacion de su velocidad adquirida, á un calor muchísimo más considerable que el dimanado de la combustion de su masa. Acerca de este punto cedamos la palabra á Tyndall:

«Es fácil calcular, dice, el maximum y el

minimum de la velocidad comunicada por la atraccion del Sol á un asteroide que circula en torno suyo; engéndrase el maximum cuando se acerca en línea recta al astro solar, llegando de una distancia infinita, por cuanto entónces se ejerce sobre él la fuerza entera de la atraccion sin pérdida alguna; el minimum es la velocidad que seria simplemente capaz de hacer girar en torno del Sol á un cuerpo enteramente contiguo á su superficie. La velocidad final del primer cuerpo, en el momento en que va á dar contra el Sol, deberá ser de 627 kilómetros por segundo; la del segundo, de 444. Al caer el asteroide en el Sol con la primera velocidad, desarrollará más de 9,000 veces el calor engendrado por la combustion de una masa igual de hulla (1). Así pues, no es en modo alguno necesario que las sustancias que caen en el Sol sean combustibles; pues su combustibilidad no podria aumentar gran cosa el espantoso calor producido por su colision ó choque mecánico.

»Tenemos, pues, aquí un modo de engendrar el calor suficiente para devolver al Sol su energía á medida que la pierde, y para mantener en su superficie una temperatura que excede á la de todas las combinaciones terrestres. Las cualidades propias de los rayos solares y su incomparable poder de penetracion nos autorizan á deducir que la temperatura de su orígen debe de ser enorme; pues bien, en la caida de los asteroides encontramos los medios de producir esta temperatura excesiva. Se puede objetar que esta lluvia de materia deberia ir acompañada de algun aumento en el volúmen del Sol; es muy cierto, mas áun cuando la cantidad de materia necesaria para producir la radiacion observada se hubiera acumulado por espacio de cuatro mil años, nos seria de todo punto imposible examinarla con nuestros más poderosos instrumentos. Si la Tierra cayese en el Sol, el aumento del volúmen que en él produciria seria imperceptible, á pesar de lo cual el calor engendrado por su choque compensaria el consumo hecho en un siglo por el Sol.» *(El Calor.)*

La caida de la Luna repondria las pérdidas de uno ó dos años, pero su volúmen sólo es la 64.ª millonésima parte del volúmen del Sol (2).

Tal es la hipótesis de la *Teoría meteórica del calor solar*, hipótesis muy ingeniosa, y físicamente muy verosímil, por cuanto se basa en un principio que ha adquirido decididamente el derecho de figurar en la ciencia, es decir, en la trasformacion del movimiento mecánico en calor. Con todo, sir W. Thomson ha desechado esta teoría por incompatible con ciertos hechos científicos perfectamente comprobados. El aumento de la masa solar, ocasionado por una lluvia de meteoritos bastante abundante para explicarnos el mantenimiento de la radiacion, habria influido en la duracion de nuestro año, acortándola. Las antiguas observaciones astronómicas son incompatibles con esta hipótesis. Verdad es que esta incompatibilidad no existe si se admite que el orígen de los meteoros no es extra-planetario y que vienen circulando de largo tiempo en la proximidad del Sol. La dificultad está en conciliar este nuevo modo de ver con las observaciones en virtud de las cuales sabemos que ciertos cometas se acercan al Sol á distancias de la superficie menores que su radio, sin experimentar en este paso perturbaciones perceptibles, lo cual prueba la imposibilidad de que exista un medio resistente alrededor del Sol. Cierto es que podria contestarse que este medio no es indispensable para la teoría, puesto que la misma causa que acelera el movimiento del cometa de Encke,—aceleracion que es un hecho de observacion perfectamente demostrado, como la del cometa de Faye,—puede precipitar á la larga en el Sol las corrientes meteóricas.

Sea de ello lo que quiera, si á pesar de estas objeciones se admitiese como verdadera la hipótesis del mantenimiento del calor solar por la

(1) Hé aquí, segun W. Thomson, cuáles serian las cantidades de calor desarrolladas por cada uno de los ocho principales planetas, en el caso de que cayeran en línea recta en el Sol: estas cantidades están expresadas por los espacios de tiempo durante los cuales podrian mantener la radiacion solar:

	Años	Dias		Años
Mercurio.	6	214	Júpiter.	32240
Vénus.	83	227	Saturno.	9650
La Tierra.	94	303	Urano.	1610
Marte.	12	252	Neptuno.	1890

Así pues, si cayeran en el Sol todos los planetas reunidos, mantendrian su calor por espacio de 45,588 años.

(2) Aparte de esto, si el Sol aumenta de volúmen y de masa al recibir incesantemente meteoros, como por otra parte su continua radiacion baja tambien incesantemente su temperatura, debe determinar desde luégo una contraccion en su volúmen, de suerte que la compensacion que se opera desde el punto de vista de su energía luminosa y calorífica, puede existir tambien por lo que respecta al volúmen. Su masa y su densidad aumentarian de un modo continuo.

caida de los meteoros, podria deducirse de ella una consecuencia digna de exámen en nuestro concepto, y que nos la ha sugerido la teoría que M. Schiaparelli ha propuesto para el orígen de las corrientes periódicas de meteoros. Segun dicho astrónomo, este orígen es exterior al sistema solar, como el de cierto número de cometas: son masas nebulosas que la fuerza de atraccion del Sol arrastra á su esfera de actividad, á la cual van, desde las profundidades de los espacios interestelares, á describir una hipérbola alrededor del foco de nuestro mundo, y que despues de desfilar en largos rastros por espacio de muchos años consecutivos, vuelven á las distancias de que procedian: las unas se escapan tal vez así, despues de una revolucion, de la gravitacion del Sol; las otras, desviadas de su primera órbita por su encuentro con los planetas, trasforman su ruta hiperbólica en elíptica y enriquecen definitivamente el sistema solar. Si así fuese, si se tiene además en cuenta que el mismo Sol viaja por una órbita inmensa de foco desconocido, fácil es representarse esa inmensa masa incandescente asolando el espacio en provecho de su potencia, semejante á las ballenas que recorren y despueblan el Océano. En su consecuencia, ya no se ve reducido, para mantener su actividad radiante á la insignificante cantidad de meteoros que existen en un momento dado en su contigüidad, comprendiéndose que á medida que devora legiones de aquellos, fórmanse otras provisiones para el porvenir, y así sucesivamente por un espacio de tiempo indefinido.

Para terminar lo que teníamos que decir acerca del mantenimiento de la radiacion solar, réstanos ahora exponer la teoría que lo atribuye á la trasformacion en calor de la fuerza de gravitacion que ha condensado en un solo núcleo las moléculas de la nebulosa primitiva. Estas moléculas, relativamente muy distantes entre sí, pero dotadas de la fuerza de gravitacion propia de toda materia, formaban de hecho en un principio una masa caótica ó confusa. Bajo la influencia de la gravitacion, se han condensado poco á poco hasta constituir un núcleo que ha llegado á ser el centro preponderante de atraccion de toda la masa. «Al precipitarse así las moléculas de la nebulosidad unas sobre otras, dice Balfour Stewart, se ha producido calor, precisamente como, si se lanza con fuerza una piedra desde lo alto de un precipicio, el calor es tambien la última forma en que se convierte la energía potencial de la piedra.»

Como se ve, esta teoría no difiere esencialmente de la primera, siendo asimismo la trasformacion de cierto trabajo en calor la que sirve para explicar la radiacion solar. Esta precipitacion continua de las moléculas basta para dar cuenta de la constancia de la radiacion ó de su mantenimiento aparente durante un espacio de tiempo que nos parece indefinido, pero cuya duracion se puede calcular. Si la hipótesis que exponemos es exacta, la masa del Sol se condensa y su volúmen disminuye, siendo tal el calor originado por esta condensacion, que si el diámetro del astro disminuyera la milésima parte de su valor, bastaria para mantener 23,000 años la constancia de la energía de la radiacion actual.

Helmholtz, el autor de este último cálculo y de la teoría que acabamos de exponer, ha calculado «que no poseemos más que la 454.ª parte de la fuerza original en forma mecánica y que la restante se ha convertido en calor, el cual seria capaz de elevar hasta 28 millones de grados la temperatura de una masa de agua igual á la masa total del Sol y de los planetas.» Si toda esta masa se convirtiera en hulla y se consumiera, tan sólo despediria la 3500.ª parte del calor de 28 millones de grados.

Conocida la velocidad del movimiento de un proyectil así como su masa, se puede calcular la cantidad de calor que resultaria de la destruccion de este movimiento. Helmholtz ha hecho este cálculo por lo que respecta á la Tierra, considerada como un inmenso proyectil lanzado alrededor del Sol con la velocidad media de 30 kilómetros por segundo, y reducido al reposo por un choque repentino. «Si nuestro globo se detuviera de pronto, en su carrera alrededor del Sol, por efecto de un choque, saldria de él tanto calor como podria despedir una masa de carbon igual á catorce veces la masa de la Tierra. Suponiendo á esta dotada de la capacidad calorífica ménos favorable, es decir la más fuerte, la del agua, su masa adquiriria de resultas del choque una temperatura de 1100 grados; por consiguiente quedaria fundida del todo, y áun gran parte de ella vaporizada. Al parali-

zarse la Tierra caeria forzosamente en el Sol, y este nuevo choque daria orígen á una cantidad de calor 400 veces mayor.»

El calor engendrado por la extincion del movimiento de rotacion de nuestro planeta seria tambien considerable. Thomson ha calculado que bastaria para mantener la radiacion solar durante 81 dias: así pues, la detencion brusca del movimiento de rotacion tendria por consecuencia una elevacion de temperatura tal, que la masa entera de la Tierra quedaria reducida á vapor.

SEGUNDA PARTE

APLICACIONES DE LOS FENÓMENOS Y DE LAS LEYES DEL CALOR

CAPITULO PRIMERO

LA CALEFACCION

I

ANTIGUOS PROCEDIMIENTOS DE CALEFACCION

De cuantas causas pueden perjudicar la salud del hombre y privarle en cierto modo del libre ejercicio de sus facultades físicas ó intelectuales, las bruscas variaciones de temperatura, los extremos de frio y de calor son las que más le afectan y de las cuales más le importa preservarse. Las regiones de la Tierra en que reina una primavera perpetua, segun la frase corriente, son muy raras; y sobre todo, poco pobladas. Aun en las zonas templadas, hay una diferencia notable entre los calores del verano y los frios del invierno. Además, á medida que la civilizacion invade mayores espacios del nuevo y del antiguo continentes, multiplícanse los viajes, la colonizacion puebla nuevas comarcas, y el hombre se ve expuesto á vivir en medios en que, si no se combaten los excesos de temperatura en sus efectos, dificultan mucho su aclimatacion y son siempre peligrosos para su salud.

De aquí resulta la necesidad de combatir esos efectos, ya sean funestos ó simplemente desagradables, por medios adecuados, y de hacer uso de ellos con arreglo á las leyes de la física y de la higiene.

Estos medios son de varias clases, y aplicables á las viviendas, á los vestidos y hasta á los alimentos; pudiéndoselos clasificar en dos categorías principales segun que tengan por objeto combatir el exceso de calor ó el del frio.

Hablemos ante todo de la calefaccion, que es una necesidad indispensable para los habitantes de las zonas glaciales y templadas.

El medio más natural, el más primitivo de preservarse del frio, es encender fuego, recibiendo directamente su calor. Nuestros antepasados de la edad de piedra no conocian otro seguramente; encendian al aire libre hogueras que les servian para cocer sus alimentos, como aún lo practican hoy, no tan sólo muchos pueblos salvajes, sino tambien los soldados en tiempo de campaña. Sin embargo, ya desde el principio hubo un progreso notable en este sistema de calefaccion, y es el que ha consistido en poner el hogar al abrigo en las primeras viviendas humanas, en las cavernas, y despues en chozas hechas de ramaje ó de madera y tambien de piedras.

¿Cuánto tiempo trascurrió ántes que se conocieran las chimeneas? Muchos siglos sin duda, y miéntras tanto el humo salia fuera de la choza, ya por la única abertura que constituia la puerta y las ventanas, ó bien, como en la Galia, en la Germania, y áun hoy dia, en el país de los esquimales, en la Tierra del Fuego, en las tribus de los veddahs del interior de Ceilan y en otros pueblos semi-salvajes, por un agujero abierto en la parte superior del techo.

No nos proponemos trazar aquí la historia de los progresos de la calefaccion ni averiguar si los antiguos, griegos ó romanos, conocian las chimeneas, ó si estos útiles aparatos hicieron su aparicion en la Edad media en las viviendas occidentales. No es de extrañar que hayan tardado tanto en introducirse unas innovaciones que hoy nos parecen tan sencillas, si se reflexiona que la civilizacion actual se ha propagado del Mediodía y Oriente al Occidente y al Norte. Los griegos pasaban gran parte de su vida al aire libre, y el suave clima de las islas del Archipiélago y de la península helénica no exigia que se tomaran precauciones excepcionales contra el frio del invierno. Contentábanse con calentar hasta cierto punto las habitaciones poniendo sobre trípodes braserillos con brasas de carbon entre cenizas, medio de calefaccion que no era ni muy eficaz ni muy higiénico. En los países meridionales, como Grecia, Italia y España, se usan todavía los *trípodes* de los griegos y los *foculi* de los romanos con el nombre de *braseros*.



Fig. 162.—Trípodes de los griegos

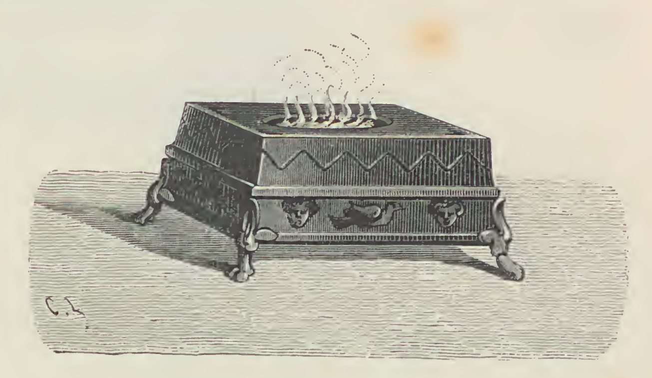


Fig. 163.—Foculus de los romanos

Pasemos, pues, á los aparatos de calefaccion usados en los tiempos modernos, y empecemos por las *chimeneas*.

II

CALEFACCION POR MEDIO DE LAS CHIMENEAS.—CHIMENEAS ANTIGUAS Y CHIMENEAS ORDINARIAS

Este es el medio de calefaccion más usado en Francia y en los países septentrionales. El hogar en que tiene efecto la combustion consiste por lo comun en una cavidad practicada en una de las paredes maestras ó medianeras de la habitacion. Sobre ella hay un conducto cilíndrico ó prismático por el cual salen el humo y los demás gases producidos por la combustion, y cuyo orificio exterior sobresale de los tejados.

En las chimeneas ordinarias, la combustion se efectúa á expensas del aire de la habitacion, la cual pierde así su oxígeno, y por consiguiente hay que renovarlo de continuo. Esta renovacion tiene lugar gracias á un fenómeno que todos conocemos con el nombre de *tiro*, y que no es otra cosa sino un movimiento ascendente del aire y de los gases que se escapan del hogar. Cuando se enciende fuego, están en equilibrio el aire exterior, que llena el conducto de la chimenea, y el de la habitacion. El calor del fuego caldea las capas de aire inferiores que van perdiendo en densidad, por cuya razon propenden á elevarse, y se elevan en efecto. El aire más frio de las capas superiores llena el vacío causado por esta ascension, y produce desde luégo una corriente descendente más enérgica que la ascendente, sucediendo entónces con frecuencia que el humo se esparce por la estancia.

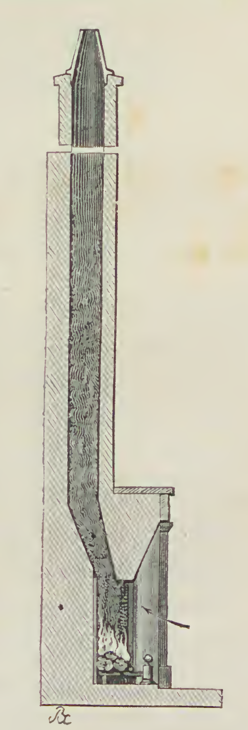


Fig. 164.—Tiro en una chimenea comun

Mas tan luégo como la columna de aire caliente se ha elevado hasta el orificio exterior del tubo ó cañon de la chimenea y lo llena enteramente, la corriente ascendente vertical predomina y el tiro ejerce todo su efecto, si bien con la condicion de que á medida que el aire de la habitacion cede su oxígeno al hogar, lo reemplace cons-

tantemente aire nuevo. Si no pudiera efectuarse esta renovacion por alguna causa, la actividad del tiro disminuiria poco á poco, y con ella la de la combustion, resultando por una parte la diseminacion del humo y por otra la sustitucion del aire viciado de la estancia, privado de su oxígeno, por gases irrespirables ó tóxicos, como el ácido carbónico y el óxido de carbono.

Así pues, el tiro es tan necesario para la higiene como para que funcione bien la chimenea.

Pero ¿cómo se llena la última condicion de que acabamos de hablar? ¿De dónde se saca el aire nuevo para reemplazar al que arrebata á la habitacion la combustion activada por el tiro?

En las chimeneas antiguas se le introducia por los resquicios de las puertas y ventanas; así es que todas aquellas despedian mucho humo cuando las aberturas estaban bien tapadas, como debia suceder en las casas nuevas. De todos modos, se tocaba un grave inconveniente, el de las corrientes de aire que molestaban en alto grado á las personas sentadas al amor de la

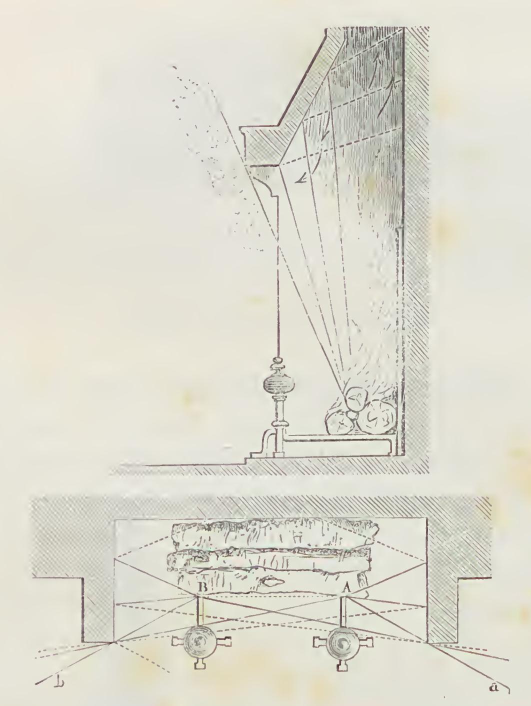


Fig. 165.—Chimenea antigua. Aprovechamiento y pérdida de calor

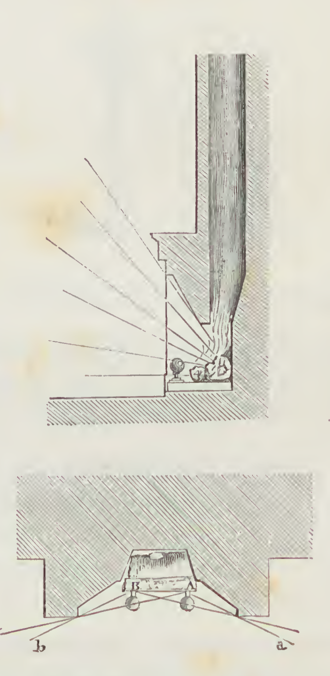


Fig. 166.—Chimenea moderna. Radiacion del calor

lumbre, y nadie ignora cuántos resfriados y afecciones reumáticas han producido los *aires colados;* no faltando por cierto hoy en nuestras casas habitaciones en que las chimeneas, construidas á la antigua usanza, produzcan los mismos efectos, esto es, la alternativa poco agradable y poco higiénica del humo ó de las corrientes de aire.

La construccion de una chimenea con arreglo á los principios de la ciencia es un arte que no data de muy antiguo. En tiempo de Luis XIV, no tan sólo en las casas particulares, sino tambien en los palacios del gran rey, se calentaban mal encendiendo grandes fuegos. Para evitar los aires colados, se apelaba á los biombos, lo cual no siempre bastaba, por cuanto el mismo Luis XIV estaba en invierno en sus habitaciones metido en una especie de caja de coche ó de litera que no daba paso al aire por ningun lado. Por lo demás, segun vamos á ver, no sólo era defectuoso el sistema de tiro, sino que el aprovechamiento del calor desarrollado por la combustion era sumamente malo.

Y en efecto, ¿cómo caldea el fuego de una chimenea el aire de la estancia y todos los objetos contenidos en ella? Al principio directamente por la radiacion de la llama y de las brasas. Pues bien, en las chimeneas antiguas, en que el hogar estaba en el fondo de una vasta cavidad cuadrada, limitada á cada lado por jambas y en la parte superior por un tablero que interceptaban la radiacion, únicamente se aprovechaba una parte escasa de los rayos de calor. Hoy, ó mejor dicho, desde la época de Gauger (1713), autor de una obra relativa al asunto, y de Rumford, se adelanta el hogar de modo

que se ofrece más ancho campo á la radiacion directa. Además se limita el interior de las jambas con superficies puestas oblícuamente ó de forma parabólica, de loza bruñida ó de cobre, y de este modo la reflexion envia á la estancia los rayos que no tienen acceso directo á ella, contribuyendo así á la calefaccion.

La abertura de la chimenea se estrecha por arriba en el punto en que empieza el conducto de humo, lo cual tiene la doble ventaja de activar el tiro é impedir que el humo se esparza por la pieza, efecto que se aumenta además con el uso de *tableros ó correderas movibles*, piezas de hierro que se bajan ó levantan á beneplácito delante del hogar, y que reemplazan ventajosamente á los fuelles.

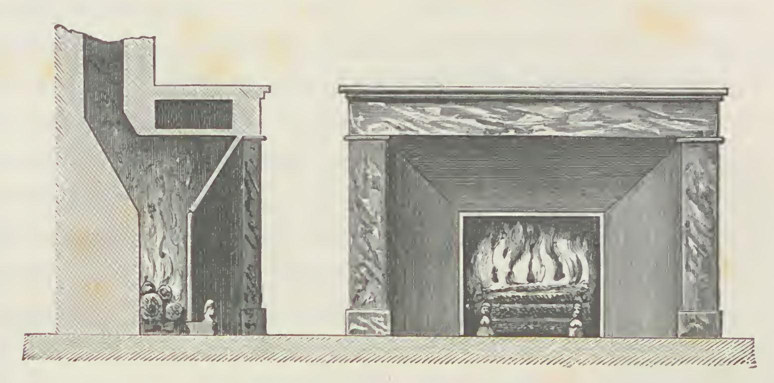


Fig. 167.—Chimenea comun moderna

El caldeo de una habitacion por una chimenea se efectúa no sólo por radiacion, sino tambien por conveccion, es decir por el trasporte de las partes caldeadas que suben hácia el techo y son reemplazadas por el aire frio, atraido incesantemente del exterior. De aquí resulta una ventilacion natural, por lo regular más que suficiente desde el punto de vista higiénico; pero tambien sucede que estando frio el aire nuevo, lo ha de calentar contínuamente el hogar, cuyo calor se aprovecha mal por esta causa. Por último, como el conducto de humo arrebata una gran cantidad de los gases calientes de la combustion (1), el rendimiento calorífico de estas chimeneas es muy escaso, lo que ha inducido á adoptar disposiciones más convenientes y á discurrir lo que se llama chimeneas ventiladoras.

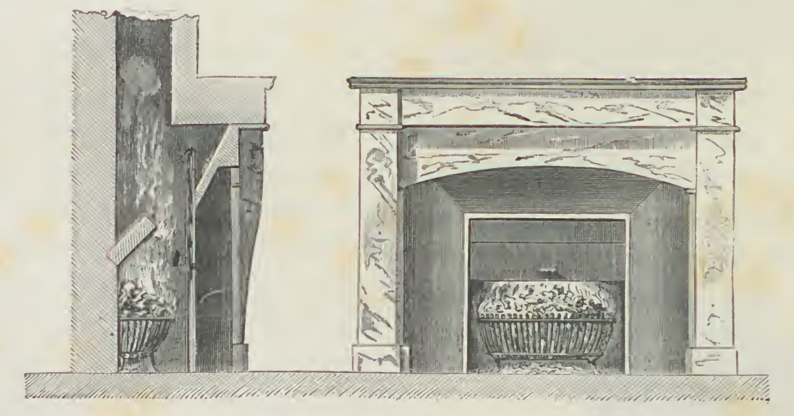


Fig. 168.—Chimenea moderna de corredera

(1) Segun el general Morin, el aire aspirado por una chimenea suele salir de ella á una temperatura de 60, 80, 100 y más grados. La pérdida de calor llega á los 6/7, 7/8 y más, de este calor dispersado; y el rendimiento calorífico de una chimenea comun no pasa por consiguiente de los 14 ó 12 centésimos del calor desarrollado por el combustible. Segun el mismo autor, la evacuacion de aire producida cada hora por una chimenea comun, de dimensiones regulares, y que funcione con mediana actividad, llega y excede á menudo de cinco veces la capacidad de la habitacion que ha de caldear. «Esta renovacion de aire, dice, bastaria, áun dadas las proporciones ordinarias de las habitaciones, para proporcionar una ventilacion de más de 30 metros cúbicos de aire por hora y por persona, suponiendo que hubiese más de una por metro cuadrado de pavimento. Por otra parte, para que el tiro y la salida del humo tengan la actividad necesaria y no los contrarien los vientos, basta con que la velocidad con que el humo se remonta á la atmósfera sea de 3 metros por segundo en el caso ordinario de un fuego de mediana actividad; pero no es necesario, y hasta seria perjudicial que la velocidad fuese la misma en el tubo general de humo, en el cual conviene que llegue solamente á 1m,40 ó 2 metros por segundo, lo que aconseja no reducir demasiado las dimensiones de este tubo.» (*Manual práctico de calefaccion y ventilacion.*) El general Morin da entónces, en una serie de cuadros, las dimensiones de los tubos de humo ó cañones de chimenea y las de las capuchas que deben cubrirlos, calculadas con arreglo á la capacidad de las piezas que las chimeneas deben caldear y ventilar.

III

LAS CHIMENEAS VENTILADORAS

El principio de las chimeneas ventiladoras es el siguiente: en lugar de introducir por los resquicios de las puertas y ventanas ó por conductos laterales el aire necesario para el tiro é indispensable para renovar el aire viciado de una habitacion, se trata de no dejar que éntre el aire nuevo y frio hasta que el hogar mismo haya elevado su temperatura. Para esto se hace circular el aire tomado del exterior por unos conductos que rodean el hogar, y despues de caldeado, se le hace desembocar por unas ventosas en la estancia, cuya temperatura contribuye á elevar así.

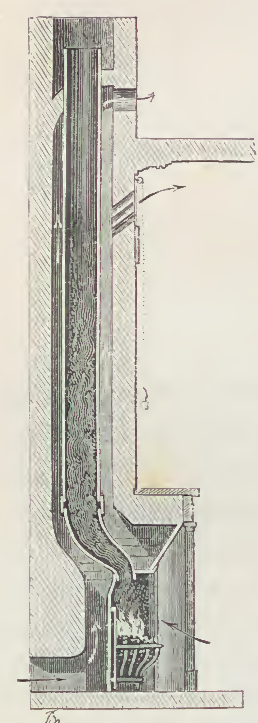


Fig. 169.—Chimenea ventiladora de Douglas Galton (1)

Con este objeto se han ideado varias disposiciones: aquí reproduciremos las más sencillas.

En una (fig. 169), el aire llega de fuera á un conducto que envuelve completamente el tubo cilíndrico de hierro del humo y tambien una

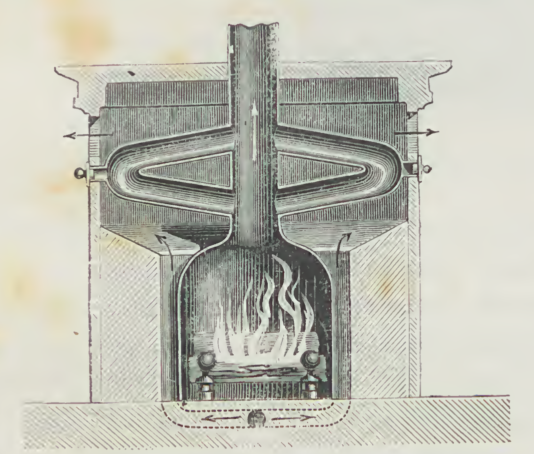


Fig. 170.—Chimenea ventiladora: sistema Joly

parte del hogar; con lo cual se caldea y se eleva hasta una abertura practicada cerca del techo en la pared del cuarto. Por consiguiente, un aire cálido á la vez que no viciado reemplaza al aire consumido por el acto de la combustion ó arrastrado por el tiro, suprimiéndose así ó poco ménos la introduccion de aire frio por las puertas ó ventanas.

En la otra chimenea (fig. 170), el hogar está formado de un aparato de hierro, y el conducto de humo se divide en otros muchos por los cuales pasan los gases calientes de la combustion. Todo el aparato caldea así la capacidad por la cual llega el aire del exterior, de suerte que al escaparse este por dos bocas de calor laterales, cuando el contacto de las paredes del aparato ha elevado su temperatura, contribuye á la vez á calentar y á ventilar la habitacion. El rendimiento calorífico de las chimeneas ventiladoras es muy superior al de las comunes, pudiendo llegar hasta el 35 por 100 del calor desarrollado por el combustible.

Otra ventaja de las chimeneas ventiladoras, está en que como se alimentan del aire necesario para el tiro, no hay inconveniente en poner dos en una misma habitacion, cuando las dimensiones de esta lo exigen. Esto no es posible con las chimeneas ordinarias, que se contrarían con frecuencia.

IV

LAS ESTUFAS

En realidad las estufas no difieren de las chimeneas sino en que son aparatos de calefaccion instalados en medio del aposento que han de caldear, en vez de estar adosados ó mejor dicho empotrados en las paredes. De esto resulta que el caldeo de las estufas se comunica por todas partes, por vía de radiacion, al aire de la estancia, y que de este modo se aprovecha muchísimo más el calor del hogar. El principio del tiro es el mismo; pero como no se ve el hogar sino por una angosta abertura, casi no hay radiacion directa de la llama ni de las brasas. No por esto es ménos vivo el tiro, sino todo lo contrario; pero la cantidad de aire evacuada es relativamente bastante escasa, de suerte que la ventilacion suele ser insuficiente (2). Higiénicamente hablando, las estufas

(1) Este tipo de chimenea ha sido inventado por el capitan de ingenieros Galton para calentar los cuarteles ingleses.

(2) Segun el general Morin, el volúmen de aire evacuado por el tiro de una estufa sólo es de unos 5 metros cúbicos por kilógramo de leña quemada, de 6 á 7 por kilógramo de hulla y de 10 á 12 por kilógramo de coke con un fuego muy activo. La evacuacion del aire viciado de los aposentos no es pues superior al 1/10 de la capacidad de los locales caldeados, cuyo aire no puede renovarse así sino una vez cada diez horas.

constituyen un medio de calefaccion inferior á las chimeneas; en cambio, económicamente con·sideradas son muy ventajosas.

Su forma es muy variada, así como la materia de que se componen. Las estufas de hierro se calientan rápidamente gracias á la gran conductibilidad del metal; sus paredes se enrojecen, y aparte del calor insoportable que resulta de esta incandescencia, resultan de ella graves inconvenientes. Uno de ellos procede de la elevada temperatura á que se pone el aire, del estado de sequedad que es su consecuencia y que afecta los órganos de la respiracion, lo cual se remedia colocando una vasija llena de agua que se evapora lentamente y proporciona al aire de la estancia la humedad indispensable.

Recientemente se ha echado de ver otro inconveniente más grave. El calor rojo del hierro da lugar á la formacion de un gas, el óxido de carbono, que es evidentemente tóxico, áun cuando esté mezclado en muy corta proporcion con el aire. En concepto de unos, el metal incandescente se hace permeable á los gases de la combustion por un fenómeno de exósmosis ó de dialisis estudiado por varios físicos, como Graham, Enrique Sainte-Claire Deville, etc.; segun otros, el gas de que se trata se forma á expensas de los polvillos orgánicos que arden al ponerse en contacto con las paredes de la estufa, ó tambien procede de la descomposicion del ácido carbónico del aire por el metal incandescente. Cualquiera que sea la causa de esta formacion, se ha comprobado el fenómeno, y con él la insalubridad de las estufas de hierro, por lo ménos siempre que estos aparatos se caldean hasta el punto de que sus paredes se enrojezcan.

Las estufas de ladrillo, de loza, de tierra refractaria, y áun las metálicas revestidas interiormente de una pared de tierra que contiene el hogar, no ofrecen este inconveniente, y si bien no se caldean tan pronto á causa de la escasa conductibilidad de la materia de sus envolventes, conservan por la misma razon mucho tiempo la temperatura á que se han elevado, siendo su uso mucho más higiénico que el de las estufas de hierro, cuya principal ventaja consiste en ser más económicas. Hemos dicho que la ventilacion no es tan buena con las estufas como con las chimeneas: pero su rendimiento calorífico es mucho mayor que el de estas, pues llega al 85 y 90 por 100 del calor desarrollado por el combustible, al paso que la ventilacion originada por el tiro es insignificante. Antes hemos visto que, segun M. Morin, el aire de un aposento caldeado por una estufa se renueva á lo sumo una vez cada diez horas.

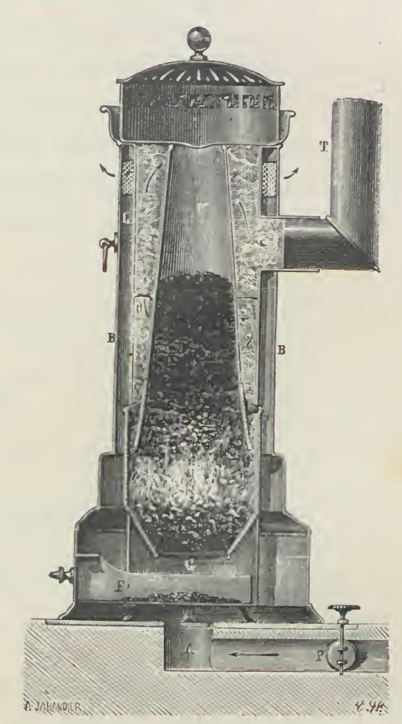
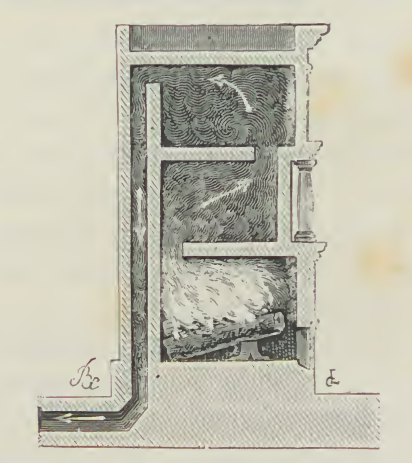


Fig. 171.—Estufa calorífera y ventiladora

La figura 171 representa una estufa calorífera, cuya disposicion es muy ventajosa, por el doble concepto de la ventilacion y del aprovechamiento del combustible. La primera se efectua por un tubo que llega debajo del hogar en A, regulándose con una llave P la introduccion del aire y por consiguiente el tiro. Al escaparse el humo lateralmente, caldea el aire encerrado en el recinto L desde el cual se difunde


Fig. 172.—Una estufa de los países del Norte

en la habitacion por respiraderos laterales. La cubierta B evita los efectos nocivos que podrian resultar del caldeo excesivo de las paredes de hierro que contienen el combustible. El carbon ó el coke se echan por arriba, levantando la tapadera superior.

En los países del Norte, en Alemania, Rusia, Suecia y Noruega, las estufas son verdaderos monumentos construidos de ladrillo y revestidos de loza ó de porcelana. El aire penetra por un conducto y se calienta, juntamente con el aire que contiene, al ponerse en contacto con los gases calientes del hogar, para diseminarse en seguida por el aposento, por orificios especiales. En otros casos, el interior de la estufa está dividido en cámaras ó compartimientos superpuestos, por cuyo interior circulan el humo y los gases de la combustion, en cuyo caso el caldeo se produce simplemente por la radiacion de la cubierta. Por lo comun, basta tener la estufa encendida unas cuantas horas por la mañana, y cerrar las aberturas cuando la masa entera del combustible se ha puesto incandescente: la escasa conductibilidad de la tierra y de la loza barnizada que forman la cubierta exterior mantienen todo el dia el calor del aparato.

CAPÍTULO II

LA CALEFACCION.—LOS CALORÍFEROS

I

LOS CALORIFEROS DE CIRCULACION DE AIRE CALIENTE

Debe darse más particularmente el nombre de *caloríferos* á unos aparatos que tienen por objeto comunicar á alguna distancia el calor producido por la combustion del hogar y difundirlo por cierto número de habitaciones distintas del local en que están instalados. Se conocen tres sistemas principales de caloríferos.

Los unos se parecen más ó ménos á las chimeneas ventiladoras ó á las estufas provistas de cámaras interiores ó de bocas de calor, porque envian aire caliente á los diferentes aposentos que deben caldear. Tales son los *caloríferos de aire caliente.*

Otros están construidos con arreglo á otro principio. El vehículo del calor emanado del hogar es el agua calentada en contacto con éste y la cual circula por tubos que la conducen por el interior de las paredes á todos los puntos cuya temperatura se trata de elevar. Estos son los *caloríferos de circulacion de agua caliente.*

Por último, hay un tercer sistema de caloríferos, en los cuales el calor sacado del hogar es el del vapor de agua hirviendo; al circular por los conductores, este vapor se enfria, se condensa y cede todo el calor procedente de este cambio de estado á los cuerpos que rodean el espacio en que está contenido así como al aire puesto en contacto con ellos.

Pasemos sucesivamente revista á los aparatos de estos tres sistemas, indicando sus ventajas y sus inconvenientes respectivos.

Los hogares de los caloríferos de aire caliente suelen estar situados en los sótanos de los edificios que han de calentar, en medio de una estancia cuyo aire se renueva introduciéndolo del exterior, pero que no está en comunicacion con el hogar mismo, para que el humo y demás gases de la combustion no puedan llegar al conducto por donde aquél penetra. El que da paso al humo y á los gases se replega muchas veces sobre sí mismo ó se divide en cierto número de conductos, ya horizontales (fig. 173), ó bien verticales, disposicion que tiene por objeto aumentar la superficie de caldeo y aprovechar todo lo posible el calor desarrollado por el combustible. Digamos desde luégo que los conductos verticales son mucho más ventajosos por este concepto, porque el aire caliente que se eleva no tropieza en su movimiento sino con la mitad inferior de las paredes de los conductos horizontales, quedando además todo el tiempo

que dura su ascension en contacto con la superficie entera de los tubos verticales (1).

Miéntras el humo y los gases de la combustion suben por la chimenea despues de haber cedido á la cámara del calorífero una gran parte de su calor, el aire caliente de esta cámara se eleva por un tubo central dividido en otros muchos, cada uno de los cuales desemboca en los diferentes pisos y piezas del edificio por aberturas que se pueden cerrar en parte ó en totalidad. La mezcla de este aire con el de la pieza eleva la temperatura de esta, pero no contribuye á la ventilacion, que hay que proporcionar de un modo independiente. El rendimiento calorífico de estos aparatos puede variar entre 60 y 80 centésimos.

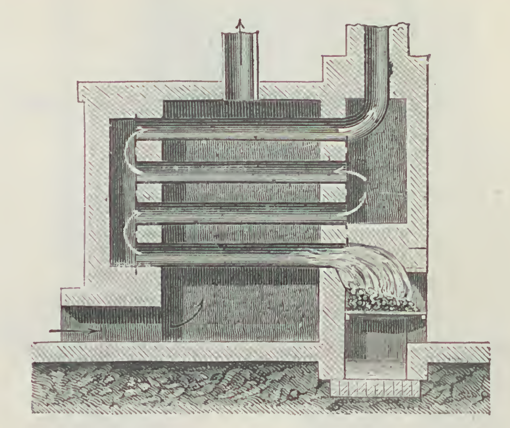


Fig. 173.—Calorífero de circulacion de aire caliente

El aire llega frecuentemente á los aposentos á una temperatura muy alta. Para remediar este inconveniente, se le hace pasar al salir del calorífero por una capacidad á la cual llega aire frio. Merced á unas aberturas provistas de registros se opera allí la mezcla de modo que se obtenga una temperatura regular, de 30 á 40 grados por ejemplo.

Por las mismas razones, la calefaccion de los caloríferos de aire caliente puede ser tan insalubre como la de las estufas. El aire que sale de ellos es seco; el óxido de carbono ú otros gases malsanos pueden filtrarse al través de los tubos metálicos, y con este sistema de calefaccion no se consigue la igualdad de temperatura. Por otra parte, como al funcionar estos aparatos no producen ninguna evacuacion del aire viciado, tampoco se puede contar con la ventilacion de los sitios que están llamados á caldear. Para remediar tan grave inconveniente es preciso establecer un hogar auxiliar, por ejemplo en la parte inferior de una chimenea que atraviesa su conducto de humo. En caso de que esto no sea posible, los caloríferos de circulacion de aire caliente se deben usar únicamente para caldear dependencias de edificios, escaleras, vestíbulos, corredores y antecámaras de paso.

Hay además otra causa que limita el uso de estos caloríferos, y es que por lo general no pueden conducir el aire caliente que suministran á una distancia horizontal cuyo radio exceda de 15 metros alrededor del hogar, por cuyo motivo hay precision de multiplicar su número.

II

CALORIFEROS DE CIRCULACION DE AGUA CALIENTE Y DE VAPOR.—CALEFACCION POR GAS

Por todos estos conceptos es preferible la calefaccion por circulacion de agua caliente. La temperatura del aire caldeado por este medio es más moderada á la vez que más regular. Fácil es comprender estas ventajas.

Los *caloríferos de circulacion de agua caliente* están instalados, como los aparatos que acabamos de describir, en la planta baja del edificio. El hogar calienta directamente el agua de una caldera C (fig. 174); el líquido, dilatado por esta elevacion de temperatura, se eleva á causa de la disminucion de su densidad por un tubo vertical que lo conduce al piso más alto: aquí comunica su calor al agua de un depósito ó capacidad que forma una especie de estufa D, la cual radia en la pieza en que está instalada y caldea el aire. Desde este depósito baja un conducto á una estufa análoga F, situada en el piso inmediatamente inferior, y así sucesivamente, hasta que el agua, vuelta á su punto de partida, y enfriada por este cambio incesante, se calienta de nuevo en la caldera y emprende otra vez el mismo movimiento.

Comprendese fácilmente que esta circulacion es continua, que empieza, por decirlo así, tan luégo como se enciende el hogar, y que llega

(1) «La experiencia ha demostrado en efecto que un calorífero de tubos horizontales cuya superficie de calefaccion era igual á 70 veces la de la parrilla no aprovechaba más que 0,63 del calor desarrollado por el combustible, al paso que el rendimiento calorífico de los caloríferos de tubos verticales, cuya superficie de calefaccion era igual á 220 veces la de la parrilla, se ha elevado á 0,84. No deja tambien de tener gran importancia la proporcion entre la superficie de calefaccion de los tubos y la de la parrilla.» (Morin, *Manual práctico de calefaccion y ventilacion.*)

al máximum de velocidad cuando ha llegado al de la diferencia de temperatura y de densidad entre el agua de la caldera y la del depósito superior. Los tubos de comunicacion sirven tambien para caldear las habitaciones. El depósito superior está provisto de una abertura por la cual se llena de agua el aparato, y por la que se escapa, ya sea el aire expulsado, ó ya el vapor procedente de una elevacion excesiva de temperatura.

Bonnemain, arquitecto del siglo pasado, es el inventor de los caloríferos de circulacion de agua caliente, usados todavía hoy sin grandes modificaciones. El agua no suele pasar en ellos de una temperatura de 100 grados, por cuya razon se los llama aparatos de *baja presion.*

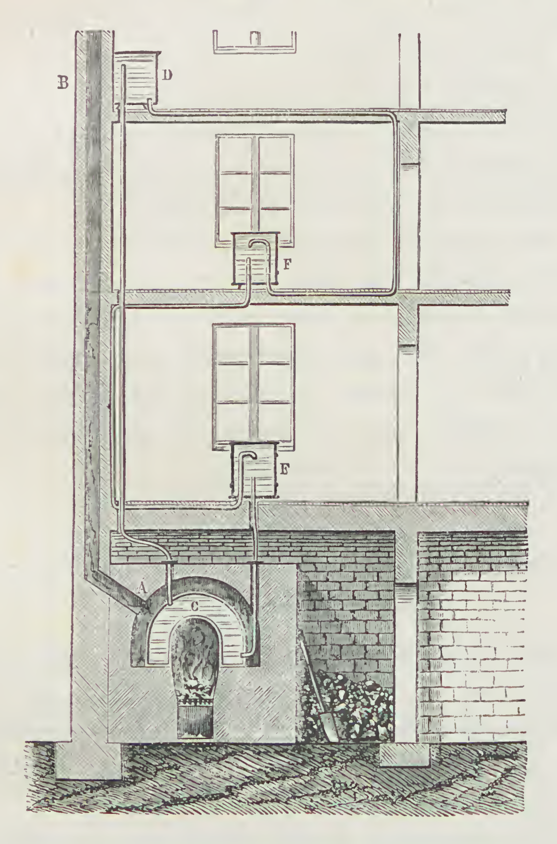


Fig. 174.—Calorífero de circulacion de agua caliente

Fig. 175.—Calorífero de circulacion de agua caliente: sistema Perkins, de alta presion

Tambien se puede emplear este sistema de calefaccion elevando el líquido á altas temperaturas, por ejemplo, á más de 300 grados: en este caso se usan los caloríferos de *alta presion* de Perkins, así llamados del nombre de su inventor. El agua circula por tubos que no tienen comunicacion alguna con el aire libre, y que suben y bajan de un piso á otro por el espesor de las paredes ó por debajo del pavimento, como en el sistema anterior; sólo que estos tubos, construidos sólidamente de hierro y muy bien ensamblados, forman espirales ó serpentines K, H, E, en cada piso, desde el hogar, en donde reciben directamente la accion del calor, hasta las habitaciones de los pisos superiores, en los cuales llenan una serie de capacidades en forma de chimeneas ó estufas, D, G, I, como se ve en la fig. 175. Sobre el serpentin del piso más alto hay un recipiente de expansion *a* que contiene cierta cantidad de aire comprimido por el agua cuando su temperatura se eleva, de modo que evita el efecto de la expansion del líquido y del vapor que se forma, y cuya presion puede llegar á un gran número de atmósferas.

La calefaccion por circulacion de agua caliente á alta temperatura está sujeta á graves inconvenientes: puede ocasionar un incendio quemando las piezas de madera contiguas á los tubos; en caso de algun escape por las junturas ó resquicios de los tubos, el vapor que se forma y sale por ellos puede causar explosiones y quemaduras peligrosas.

El tercer modo de calefaccion por circulacion del vapor de agua está basado en la gran cantidad de calor que abandona el vapor al con-

densarse. Sólo se requieren tubos de escasa dimension; pero varios inconvenientes, como la desigualdad de temperatura procedente de las negligencias del caldeo, las condensaciones que de ello resultan, los choques, las roturas, las explosiones, han hecho renunciar á este sistema, que no se emplea hoy sino en los talleres, es decir, donde es económico utilizar el vapor cuando se escapa de las máquinas.

El ingeniero Grouvelle ha discurrido un sistema mixto, muy ingenioso. Consiste en combinar la calefaccion por circulacion de agua caliente con la calefaccion por vapor, empleando este en calentar el agua de las estufas instala-

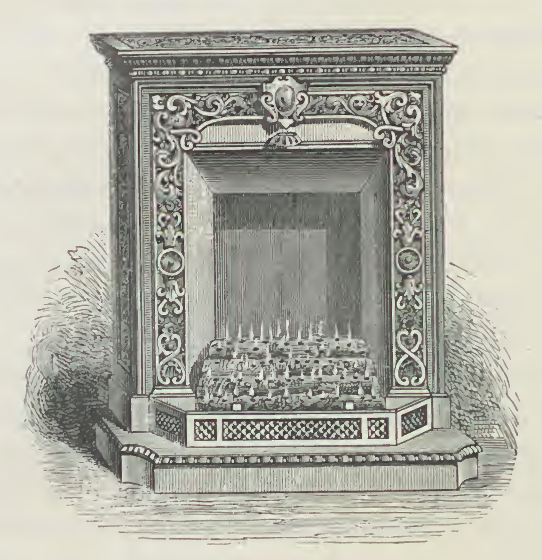


Fig. 176.—Chimenea de gas

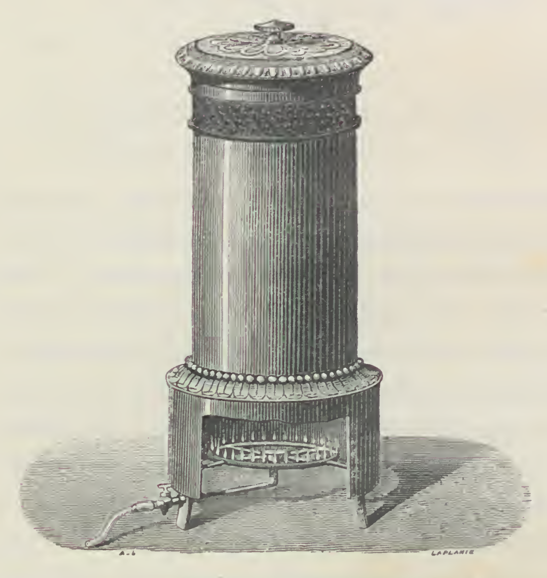


Fig. 177.—Estufa de gas

das en los diferentes pisos ó habitaciones de un edificio, como acabamos de ver por la descripcion de los caloríferos de circulacion de agua caliente al aire libre. Los hospitales, las cárceles, los grandes establecimientos públicos caldeados por este sistema lo están á la vez higiénica y económicamente, sucediendo lo propio en los teatros, salones de concierto y reunion y en las escuelas. Por lo comun, aplicando cualquiera de estos métodos de calefaccion, se procura resolver al mismo tiempo el importante problema de la ventilacion. Los principios son

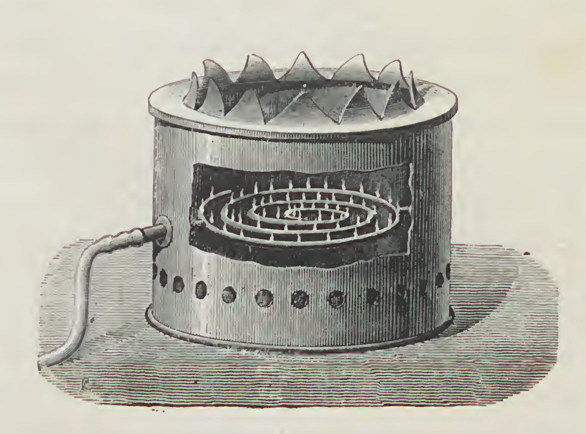


Fig. 178.—Hornillo de laboratorio

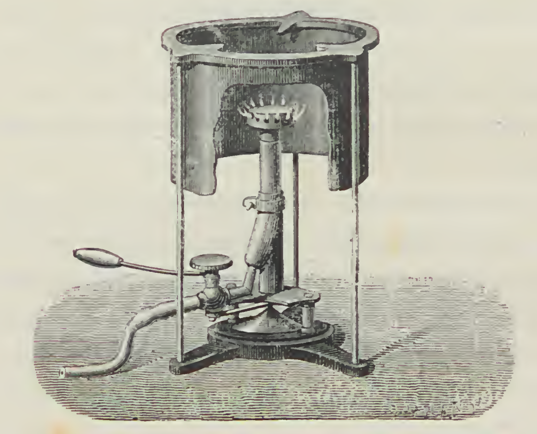


Fig. 179.—Hornillo de laboratorio: mechero Wiesneg

conocidos; pero la práctica no por eso deja de ser sumamente difícil.

Réstanos indicar un sistema de calefaccion recomendable por ciertos conceptos y para usos especiales, ya que no desde el punto de vista económico, á lo ménos por su limpieza y comodidad, pero que no es posible más que en las ciudades; nos referimos á la calefaccion por gas. Pero no hay que engañarse con respecto á este sistema; con él no se toca otro resultado sino la sustitucion de un combustible por otro, y los aparatos ideados para aplicarlo sólo tienen un objeto; apropiar la combustion de un número cualquiera de mecheros de gas del alumbrado á

la elevacion de temperatura de una estufa, de un hornillo de cocina, de un aparato industrial, etc.

Aquí presentamos algunos ejemplos de las disposiciones adoptadas (1), sin extendernos más sobre un método de calefaccion basado en los mismos principios que aquellos en que se emplea como combustible la hulla, la leña, el coke, la turba, etc.

III

DISTRIBUCION DEL CALOR EN LAS HABITACIONES DE UNA CIUDAD Y EN LOS CARRUAJES DE UN TREN

Los varios sistemas de calefaccion descritos en los artículos que preceden, basados en la circulacion del aire ó del agua calientes, y del vapor de agua, apénas se han aplicado hasta ahora más que á edificios aislados, más ó ménos espaciosos, es decir á un conjunto de construcciones que forman un todo solidario, y arreglado con este objeto especial por el arquitecto del edificio.

Los americanos han tratado de darle una aplicacion más extensa, abarcando toda una ciudad. Así como hay compañías que conducen gas á todas las casas de una poblacion, y en cada casa á todos los aposentos que lo necesitan, así tambien han tratado de distribuir el calor por un procedimiento análogo, es decir, produciendo en una fábrica central la cantidad de calor necesaria, y enviándola á domicilio por una cañería subterránea. Hanse hecho las primeras pruebas de este género de calefaccion colectiva en Buffalo y en Lockport, y luégo en muchas de las grandes ciudades del Norte de los Estados Unidos.

De los tres modos de circulacion, el basado en la cesion del calor latente de vaporizacion del agua era sin duda el único aplicable en tan grande escala. El vapor pasa desde las calderas de la fábrica central á unas cañerías de hierro que ha habido que preservar de las pérdidas ocasionadas por la conductibilidad del metal, á cuyo efecto se las ha envuelto en unas cubiertas gruesas de fieltro, sustancia poco permeable al calor. Forrados los tubos de este modo, se los encierra en unos conductos de madera que acaban de preservarlos del enfriamiento.

El vapor que circula de tal modo por las calles de la ciudad, llega por unos tubos de distribucion asignados á cada casa y á cada piso ó habitacion, á unos aparatos situados en los locales que se ha de caldear. Estos *difusores* son cañerías de hierro que se caldean al contacto del vapor y difunden calor á la manera de las estufas comunes. Para aumentar su superficie radiante, están provistos de aletas, longitudinales en direccion de las aristas del cilindro, ó trasversales y por consiguiente circulares. Mediante una llave de admision se puede regular la introduccion del vapor segun las necesidades del caldeo; el difusor lleva además en su parte inferior un *purificador* por el cual sale el agua de condensacion, agua por cierto bastante caliente para que, recogiéndola, pueda aprovecharse para algun uso doméstico ó industrial.

La prueba de este modo de distribucion del calor es demasiado reciente todavía para poder apreciar sus ventajas ó reconocer sus inconvenientes.

La calefaccion de los carruajes de los trenes de las vías férreas ha sido objeto de múltiples ensayos, habiéndose experimentado sucesivamente todos los sistemas, como estufas, cilindros llenos de arena calentada al rojo oscuro, agua ó aire calientes, vapor, etc. Los ingenieros de la Compañía del Este en Francia, despues de discutir y comparar todos los sistemas, han deducido en conclusion que el agua caliente es lo más apropiado y lo que mejor llena todas las condiciones de una calefaccion constante é higiénica. Con este objeto se llenan de dicho líquido unos caloríferos que se colocan entre las banquetas. Cuando se enfria el agua, se quitan los caloríferos y se la vuelve á calentar, ya por inyeccion directa de vapor, ó bien por inmersion en un depósito de agua cuya temperatura se mantiene, mediante una inyeccion de vapor, á un punto cercano á la ebullicion. Con este último procedimiento bastan cinco minutos para elevar la temperatura á 90°, y así lo hace la

(1) En las figuras 176 y 177 se ve cómo suelen construirse las chimeneas y las estufas para la calefaccion por gas. Unas piezas de hierro llenas de agujeros dan paso al combustible, ó bien se componen de un tubo que forma corona, con agujeros tambien para dar paso á las luces. En realidad, es un combustible sustituido por otro, más limpio y más cómodo, pero más costoso. Los hornillos de laboratorio que representan las figs. 178 y 179, se adoptan ahora en todas partes y, siendo de variadas formas, sirven para las mil operaciones que exigen los experimentos de física y química. Tambien hay en uso otros aparatos análogos en multitud de industrias, sin contar su introduccion en las habitaciones privadas donde se los utiliza siempre que se necesita tener fuego con prontitud.

Compañía del Este. En las líneas de Orleans, del Oeste y del Norte, se calientan de nuevo los caloríferos por inyeccion directa de vapor. La primera de dichas compañías ha adoptado tambien un aparato, al cual da el nombre de *termosifon*, y que sirve para calentar los compartimientos de un mismo carruaje. Hé aquí en qué consiste.

Hácia la parte media del coche, y bajo la saliente formada por la caja sobre el armazon, va colocada una caldera de hierro de hogar interior, de cuya parte superior salen dos tubos que conducen el agua caliente á los extremos del wagon. Esta agua circula en seguida por unos caloríferos situados trasversalmente entre los banquillos de cada compartimiento, volviendo luégo por una canalizacion especial á la parte inferior de la caldera. Para compensar las pérdidas ocasionadas por la condensacion, hay un recipiente lleno de agua que comunica con la atmósfera y sirve de reserva, facilitando además la libre circulacion del agua. El humo del hogar sale por un tubo adaptado al eje de uno de los tableros y que sobresale del techo del carruaje. De este modo se tiene, á los piés de los viajeros, una temperatura de 50 á 60º, y en el wagon un exceso de 8 á 10º sobre la temperatura exterior. Este sistema de calefaccion, que no requiere que se abran las portezuelas para cambiar los caloríferos enfriados, no consume más de 5 céntimos de combustible por hora y por carruaje.

En Bélgica se calientan los wagones haciendo circular por ellos agua caliente, que pasa desde el ténder á los piés de los viajeros, y vuelve desde los coches á aquel ó va directamente, parte al inyector de caldeo, y parte al de alimentacion de la caldera. Este sistema no tiene más inconveniente que el de ser doble la canalizacion de los coches. En Alemania y Austria se emplea la circulacion del vapor por tubos que pasan bajo los piés de los viajeros, y en Suecia el vapor y el aire caliente combinados: el primero circula por un tubo de hierro, provisto de aletas que aumentan la superficie de radiacion, y que va metido en una caja de madera colgada debajo del bastidor. El aire de la caja, calentado por el tubo de vapor, penetra en los compartimientos por orificios practicados debajo de los asientos.

El ingeniero francés M. Ancelin ha propuesto utilizar para caldear los wagones el calor latente de fusion de un compuesto, el acetato de sosa, que puede almacenar más calor que el agua á los mismos límites de temperatura. «Un calorífero de 11 litros, dice, contiene unos 15 kilógramos de acetato; suponiendo que su temperatura inicial es de 80º, temperatura máxima de los caloríferos de agua al meterlos en los wagones, desarrollará:

Calor sensible de 80º á 60º. . . .	225 calorias
Calor latente.	1,410 —
Calor sensible de 60 á 40º.. . . .	96 —
Total. . .	1,731 calorias

»El mismo calorífero de agua desarrollará, de 80º á 40º, 440 calorias; por consiguiente el acetato dará cuádruple calor que el agua (1).»

Aparte del notable ahorro de combustible, este modo de calefaccion tendria la ventaja de evitar la renovacion frecuente del agua de los caloríferos, que se haria de una vez para siempre, gracias á la estabilidad del compuesto empleado. Las pruebas hechas en varias líneas del extranjero han dado, segun parece, buenos resultados.

IV

LOS COMBUSTIBLES: SUS PODERES CALORÍFICOS

Todo esto nos conduce naturalmente á decir algo acerca de los combustibles, de su valor relativo, y del calor que desarrollan, cuestion que no deja de ser importante tratándose de la calefaccion.

La madera ha sido el primer combustible usado, y aún hoy dia hay países enteros que no emplean otro. Seguramente es el más agradable, pero tambien uno de los más costosos, excepto en las comarcas cubiertas de bosques y apartadas de las minas de carbon de piedra. La hulla, la antracita, el lignito y otros combustibles minerales, el coke, que es el residuo dejado por la destilacion de la hulla, son de un uso cada dia más frecuente, porque constituyen un sistema de calefaccion más económico. En ciertos países se quema turba; siendo en realidad el reino vegetal, tanto el de hoy como el de los antiguos períodos geológicos, el que proporciona el elemento del calor desarrollado en los diferentes aparatos de calefaccion que hemos

(1) El acetato de sosa llega á la fusion acuosa hácia los 59º; y en virtud de este cambio de estado absorbe unas 94 calorias.

enumerado. Hablando en rigor, el gas del alumbrado, empleado como combustible, se halla en igual caso; es uno de los compuestos de la hulla, y este simple hecho basta para demostrar porqué la calefaccion por gas es más costosa que la procedente de la hulla misma de la que se extrae dicho gas.

Basados en los experimentos de los físicos, comparemos ahora los poderes caloríficos de las referidas sustancias, entendiéndose por tal poder el número de unidades de calor que desarrolla la combustion íntegra de un kilógramo de cada una:

Combustibles	Calorias	Relacion de los poderes caloríficos
Hulla.	8000	1,00
Antracita.	7500	0,95
Coke..	7000	0,90
Lignito.	6500	0,80
Carbon vegetal.	6000	0,75
Turba.	5000	0,60
Leña seca.	4000	0,50
Leña (20 por 100 de agua)	3000	0,38
Gas del alumbrado. . . .	10000	1,25

El gas del alumbrado es el de mayor poder calorífico (1); á continuacion siguen la hulla y los combustibles minerales, y luégo la turba y la leña húmeda, inferior á todos los demás combustibles.

Aparte de esto, ya hemos visto que los aparatos de calefaccion, áun los más perfeccionados, distan mucho de aprovechar todo el calor de la combustion, pues la mayor parte de este calor se escapa al exterior por la chimenea.

¿Se desea conocer las pérdidas considerables que se disipan anualmente en humo? Tomemos por ejemplo el consumo de Paris. El *Anuario de la Oficina de longitudes para 1872* nos da la cifra de este consumo en 1869:

Leña de varias clases. .	994,057 esterios
Carbon vegetal. . . .	4.902,315 hectólitros
Hulla, coke, turba, etc. .	682.011,827 kilógramos (2)

Aun tomando una cifra inferior al valor medio de estos combustibles, no puede ménos de estimarse en 69 millones de francos el gasto total, 25 millones por la leña, 24 por la hulla y 20 por el carbon vegetal. Pero este último combustible apénas sirve para la calefaccion, y una gran parte de la hulla se emplea en usos industriales. La pérdida de calor no es ménos positiva para las tres clases de combustible, pudiendo afirmarse que un 60 por 100 cuando ménos se disipa en humo sin aprovecharse; por consiguiente, resulta una pérdida anual de más de 40 millones de francos, pérdida que seguramente podria reducirse mucho si se adoptasen en todas partes aparatos construidos racionalmente. El bolsillo de los consumidores reportaria de ello tanto beneficio como su salud. ¿Qué seria si aplicásemos los mismos cálculos á toda la Francia y á cada país en el mundo entero?

(1) Conviene observar que es preciso destilar 100 kilógramos de hulla para producir 28 metros cúbicos de gas. Calculando en 0,4 la densidad de este gas, tendremos que el peso de los 28 metros cúbicos es $14^{k},5$ próximamente. 100 kilógramos de hulla quemados directamente dan 800,000 calorias, pero los 28 metros cúbicos de gas que de ellos se extrae sólo dan 145,000. Esta es la razon de que la calefaccion por gas sea más costosa, á pesar de su gran calor de combustion.

(2) Doce años despues, ó sea en 1881, el consumo fué de:

Leña..	793,000 esterios
Carbon vegetal.	5.092,000 hectólitros
Hulla, etc.	952.000,000 kilógramos

Vése que el consumo de hulla se ha desarrollado considerablemente y que el de la leña ha disminuido. En estas cifras, no se consigna la parte, probablemente bastante escasa, que corresponde al gas del alumbrado.

CAPITULO III

VARIAS APLICACIONES DE LAS LEYES DEL CALOR

I

VIVIENDAS

La temperatura de una habitacion no depende solamente de los aparatos de calefaccion instalados en ella, ni del calor que comunican al aire por vía de radiacion, de conveccion ó de cualquier otro modo de propagacion calorífica, sino tambien, y en primer lugar, de la temperatura exterior, y en segundo, de las paredes ó abrigos que con mayor ó menor eficacia se oponen á que el calor interior salga fuera. Esta pérdida inevitable es más ó ménos rápida segun el espesor de las paredes, segun que los materiales de que están formadas sean buenos ó malos conductores del calor, y finalmente, segun que las aberturas practicadas en ellas, cerradas con vidrieras para dar paso á la luz del dia, sean más ó ménos numerosas y presenten mayor ó menor superficie.

Las paredes gruesas, hechas de materiales malos conductores, proporcionan á los que las habitan la doble ventaja de preservarlos en invierno del frio, y en verano del calor exterior. La piedra y el mármol son por este concepto ménos ventajosos que el ladrillo y, sobre todo, que la madera. En los países frios, como Rusia, muchas casas de campo tienen paredes formadas de troncos ó tablones gruesos que constituyen un doble tabique, llenándose el espacio que media entre uno y otro de paja trillada, aserrin, musgo seco y otras materias muy divididas. El aire aprisionado en los intersticios forma con estas materias y los tabiques un conjunto muy poco permeable al calor, muy mal conductor, siendo por tanto un abrigo excelente contra la baja temperatura de la parte de afuera.

Pero durante el dia el calor se pierde con más rapidez por las puertas y ventanas de cristales. El mejor medio para evitar esta pérdida consiste en poner ventanas dobles; como el aire encerrado entre las dos delgadas vidrieras no se renueva y es además un cuerpo mal conductor, constituye una envolvente protectora que difícilmente atraviesa el calor oscuro del interior, al paso que el calor luminoso de los rayos solares penetra con facilidad en el aposento. De esta suerte se utiliza la propiedad de los medios que son á la vez diatermanos para los rayos luminosos y atermanos para la radiacion del calor oscuro.

Este doble sistema de vidrieras se usa con gran ventaja en las estufas ó invernaderos, cuyas plantas necesitan de la luz del dia, y se resienten de la oscuridad y de la humedad cuando, para preservarlas del frio, se tapan las vidrieras con esterillas ú otros abrigos opacos.

Las cuevas ó sótanos están ménos expuestos que las habitaciones de los pisos altos al cambio de calor que tiene efecto de dentro afuera ó de fuera adentro: por esto conservan todo el año una temperatura media que varía tanto ménos cuanto más profundos son, pareciendo por tal motivo calientes en invierno y frescos en verano, y si bien no se los puede considerar como sitios saludables para vivir en ellos, sirven por lo ménos para conservar muchos objetos que se echarian á perder á causa de un frio ó de un calor excesivos.

Las neveras vienen á ser unas cuevas más profundas que las ordinarias, abiertas en el suelo, revestidas interiormente de paredes de ladrillo, y en las cuales se amontona durante el invierno hielo para conservarlo y utilizarlo en las épocas de gran calor. Despues de llena la cavidad de fragmentos de hielo, se echa en él, durante las grandes heladas, cierta cantidad de agua que lo cubre con una capa de hielo aisladora que intercepta el acceso del aire exterior, y en seguida se extiende sobre esta capa otra de paja que es mala conductora del calor. Un tejadillo de bálago y musgo y algun plantío de

árboles que con su sombra preservan á la nevera de los rayos solares, acaban de hacer el interior de la cavidad enteramente impermeable al calor del exterior.

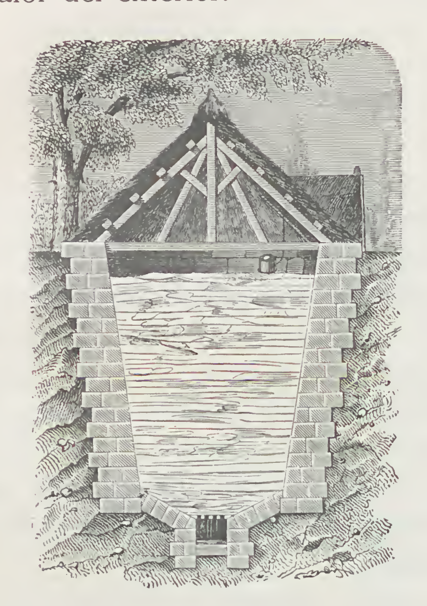


Fig. 180.—Una nevera

Como se ve, la mayor parte de estas precauciones están basadas en la escasa conductibilidad calorífica del suelo, de los ladrillos y de las materias divididas.

II

VESTIDOS

De las viviendas pasemos á los vestidos.

Apénas hay region en que no sea indispensable el vestido para preservarse de la intemperie, y sobre todo del rigor de la temperatura, ya en invierno ó ya en verano. El cuerpo solo del hombre no está guarecido contra esta accion de que tanto podria resentirse su salud; no tiene, como la mayor parte de los animales, una cubierta de pelos ó plumas, ó vellon, más ó ménos espesa que le proteja contra la inclemencia de la atmósfera; por lo cual ha tenido que recurrir á su industria, por medio de la cual no ha hecho en rigor otra cosa sino imitar á la naturaleza de un modo más ó ménos inteligente, segun el grado de civilizacion á que ha llegado.

En el estado de salvajismo que caracterizaba á las primeras edades de la humanidad, estado del cual existen aún tantos restos, el hombre tuvo que reducirse á cubrirse con las pieles de los animales muertos en la caza. Este traje primitivo es todavía hoy el de muchos pueblos bárbaros. En los climas polares, los esquimales, los lapones y los samoyedos se visten de pieles de osos, ó de renos, cosiéndolas toscamente. El cuero es impermeable á la humedad, pero los pelos de que está cubierto son los que forman la capa verdaderamente protectora del frio, á causa de su poca conductibilidad para el calor.

La temperatura del cuerpo humano es poco más ó ménos constante en todos los climas y en todas las estaciones. La accion exterior no la modifica, por decirlo así. «La sangre de un lapon, dice Tyndall, es casi tan caliente como la de un indio, y el navegante inglés, al hacer rumbo de norte á sur ó de sur á norte nota que la temperatura de su sangre apénas ha aumentado á medida que se acerca al ecuador, ni disminuido conforme se aproxima al polo.» Lo que se procura evitar por medio del vestido es la sensacion desagradable que nos causa el contacto de nuestra piel con el aire fuertemente caldeado por los rayos del sol ó con el aire frio, son los accidentes que para nuestra salud resultan de este brusco cambio.

Hay tres cosas que hacen á un tejido impropio para conducir el calor: la naturaleza de la sustancia de que está compuesto, su misma estructura y su espesor. Por el primer concepto véase cómo se clasifican las diferentes sustancias, pasando de la más conductora á la que lo es ménos, segun los experimentos de Rumford: seda torcida, algodon ó lana, lana de cordero, tafetan, seda en rama, pelo de castor, edredon, pelo de liebre.

Vése que la seda es mejor conductora que la lana, y como los tejidos de seda son más tupidos que los de lana, estos últimos son doblemente ventajosos por su tejido y por la materia de que este se compone.

La experiencia diaria confirma estos resultados sacados de la induccion. Las ropas de lana son las que mejor preservan del frio, porque se oponen al paso del calor del cuerpo. En verano, y con tal que el tejido sea ligero, son tambien preferibles para detener los rayos de calor é impedir que penetren hasta nuestro cuerpo. Por otra parte, sábese que el color no deja de tener su influencia, y que los trajes negros ó de colores oscuros emiten calor con más facilidad que los de colores claros ó que los blancos, de suerte que en invierno son estos preferibles

á aquellos, por cuanto favorecen ménos la pérdida de calor del cuerpo. En verano, los vestidos blancos absorben el calor con ménos facilidad que los oscuros; y por consiguiente, á igual conductibilidad son preferibles á estos últimos.

Hay que advertir que no es el peso de la tela lo que hace que la ropa abrigue, sino la estructura dividida del tejido; un edredon, lleno de plumon fino y leve, abriga más que las mantas más recias y pesadas.

Vése por estos ejemplos cuánto importa tener en cuenta las diferentes propiedades calorimétricas de los cuerpos, su conductibilidad, su poder radiante, absorbente, y emisivo, en las aplicaciones usuales relativas á la calefaccion, á la construccion de viviendas y al vestido. Pero no es esto todo: hay que atender tambien á las indicaciones de la higiene, por más que estas no sean de incumbencia de la física, sino de la fisiología. Buscamos el calor en invierno y el fresco en verano; mas es preciso saber hasta qué limite debemos hacerlo para que la salud que es el equilibrio de las funciones de nuestro cuerpo, se mantenga constantemente en buen estado.

III

LÁMPARAS DE SEGURIDAD DE LOS MINEROS

En la *Primera parte* de este tomo hemos visto cómo una tela metálica colocada sobre una llama de gas, impide que se propague la com-

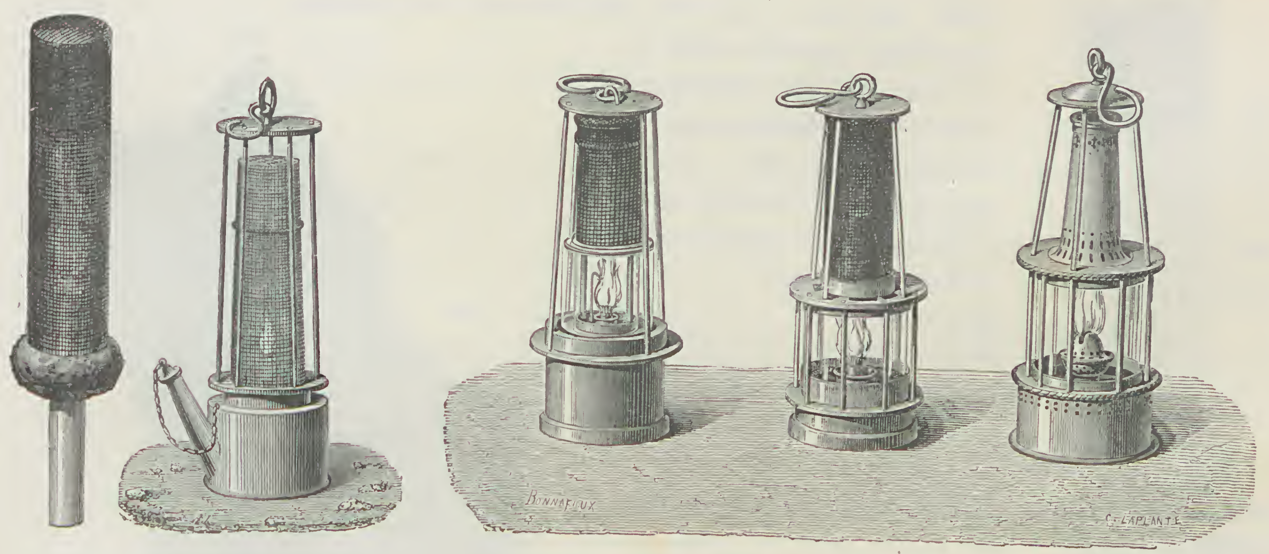


Fig. 181.—Primera lámpara de seguridad de Davy: lámpara de rejilla

Fig. 182.—Lamparas de seguridad de los mineros. Lámparas de rejilla y de tubo de cristal

bustion por encima de la tela. Esta absorbe bastante calor para que la temperatura del gas, que ha pasado por las mallas del tejido, esté bajo la temperatura de la ignicion.

Un ilustre físico, un ingeniero inglés, Davy, se ha valido de esta importante propiedad para evitar las desgracias que ocurrian en las minas á causa de la inflamacion del gas *grisú*. La lámpara de minero que lleva su nombre ha recibido, desde la época en que Davy la inventó, varias modificaciones ó perfeccionamientos, siquiera el principio de su construccion sea el mismo. Las figuras 181, 182 y 183 representan varios modelos. En todos ellos, la detonacion que resulta de la introduccion de la mezcla explosiva en la capacidad donde arde la llama de la lámpara queda reducida al interior mismo; la inflamacion está limitada á este reducido espacio. La envolvente ó camisa metálica impide que el calor se propague al exterior, y el minero advierte el peligro sin temer sus terribles efectos. A decir verdad, debe servirse de la lámpara con precaucion y cuidar mucho de que se halle siempre en buen estado, porque la menor rotura de los hilos de la tela metálica, por poco que produzca una abertura en la cubierta protectora, puede bastar para que comunique la llama con el exterior. Así tambien, cualquier movimiento algo brusco de la lámpara origina la penetracion mecánica de la llama entre las mallas, pudiendo producir la explosion temida. Las catástrofes de que aún son teatro las minas de vez en cuando, demuestran sobradamente que no se observan siempre estas precauciones con todo rigor.

Los nuevos modelos de la lámpara Davy dan

más luz que los primitivos, estando la llama rodeada de tubos de cristal más ó ménos altos. Además, una disposicion particular previene la imprudencia de los mineros, porque no pueden abrir la lámpara sin apagarla. La lámpara Combes, representada en la figura 183, está formada de un grueso tubo de vidrio que envuelve la llama, sobre la cual lleva un tubo metálico rodeado á su vez de una tela ó enrejado metálico. El aire necesario para la combustion penetra lateralmente por aberturas situadas debajo de la llama, á la cual no llega el aire sino despues de atravesar dos espesores de telas metálicas.

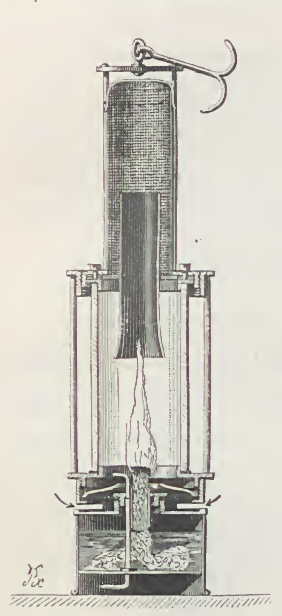


Fig. 183.—Corte de una lámpara Combes

IV

VARIAS APLICACIONES DOMÉSTICAS DEL CALOR

Hagamos mencion de algunos usos basados en el escaso poder conductor de ciertas sustancias.

¿Porqué son de madera los mangos de las herramientas y utensilios de metal que se han de meter en el fuego? ¿Porqué se guarnecen de mimbre las asas de las cacerolas y de cuero ó de tela las de las planchas? Porque la madera, el cuero y la lana tienen muy escaso poder conductor, razon por la cual parecen estas sustancias más calientes que los metales y que el mármol en un mismo recinto en el cual todos los objetos tienen, sin embargo, igual temperatura. El pavimento de madera de una habitacion es ménos frio que el enladrillado porque la madera conduce peor el calor que el ladrillo, y por análoga razon un pavimento de abeto es ménos frio que uno de roble. En todos estos ejemplos, el contacto de la mano con cuerpos buenos ó malos conductores causa una sensacion de frio ó de calor, porque el cambio de calor que se efectua en un sentido ó en otro, entre estos cuerpos y nuestra piel, es más ó ménos rápido. La impresion desagradable que procede de una quemadura reconoce por causa un cambio demasiado brusco de calor que ocasiona la desorganizacion del tejido. La misma impresion puede resultar del contacto con un cuerpo cuya temperatura es muy baja, como la que se siente tocando un pedazo de mercurio ó de ácido carbónico congelado. En los climas polares, la mano no puede tocar impunemente los objetos metálicos, siendo menester envolverlos en tela ó ponerse gruesos guantes para cogerlos.

La escasa conductibilidad de algunas sustancias, como la lana y el fieltro, ha hecho que se les dé una curiosa aplicacion doméstica de la cual diremos dos palabras.

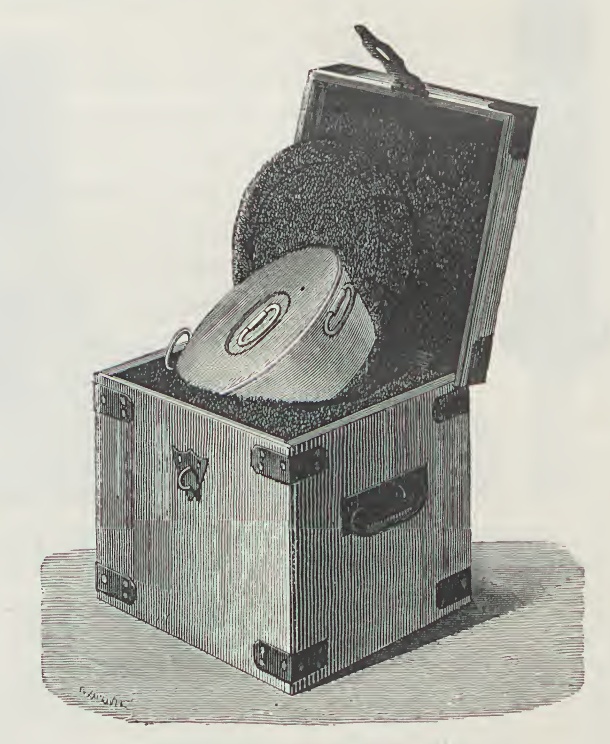


Fig. 184.—Marmita automática

La *marmita automática* (fig. 184) que se veia en la Exposicion universal de 1867 y que se usa en los países del norte de Europa, no es otra cosa sino una marmita metálica en la que se echa carne, agua y todas las legumbres é ingredientes que constituyen una olla. Todo ello se pone al calor de un hornillo hasta que hierve. Tan luégo como llega á la temperatura de la ebullicion, se mete la marmita en una caja cuyo interior y tapadera están forrados de fieltro grueso; además se cubre la marmita con una almohadilla de la misma materia, se la cierra herméticamente y entónces se puede abandonar

el utensilio á sí mismo: la coccion continúa y acaba sin fuego, porque gracias á la escasa conductibilidad de la envolvente, el calor interno conserva muchas horas una temperatura elevada, no bajando al cabo de tres más que 12 grados por término medio.

CAPÍTULO IV

VARIAS APLICACIONES DE LAS LEYES DEL CALOR.—DILATACION

I

PÉNDULOS COMPENSADORES

En el capítulo de las *Aplicaciones de la gravedad* que trata del péndulo hemos visto que una de las condiciones esenciales del uso de este aparato en los relojes es la invariabilidad de la longitud del vástago ó varilla, ó, si se quiere, de la distancia del punto de suspension al centro de oscilacion.

Pero esta invariabilidad supone que la temperatura á la que se ha arreglado el péndulo es constante; pues si aumenta, la materia de que está formada la varilla se dilata, el péndulo se alarga y sus oscilaciones duran más; y si dicha temperatura baja, la materia se contrae, el péndulo se acorta y las oscilaciones son más rápidas, resultando de aquí que un reloj bien arreglado á una temperatura media debe *atrasar* en verano y *adelantar* en invierno.

¿Cómo se remedia este defecto? ¿Cómo se le atenúa, á lo ménos, á fin de asegurar la invariabilidad de longitud del péndulo y el isocronismo de sus oscilaciones? Se ha conseguido utilizando la desigualdad de dilatacion de los varios metales y compensando el crecimiento de longitud del péndulo, que hace bajar el centro de oscilacion, con la elevacion de este mismo centro. De aquí el nombre de *péndulos compensadores* dado á las varias combinaciones discurridas con este objeto.

Fig. 185.—Disposicion de las varillas en el péndulo compensador de rejilla

Uno de las más usados es el *péndulo de cuadro* ó *de rejilla*, inventado por Harrison. El vástago está formado de una serie de varillas de laton y de acero alternativamente, reunidas por travesaños, de modo que los alongamientos producidos por la dilatacion de todas las varillas de acero tienden á bajar el centro del péndulo, al paso que los que afectan á las varillas de laton, propenden por el contrario á levantarlo. La varilla del medio, que aquí es de acero (figuras 185 y 186) es la que sostiene el disco del péndulo: pasa por unas aberturas practicadas en los travesaños con la holgura suficiente para quedar independiente de ellos. La varilla de suspension está por el contrario fija al travesaño superior del cuadro que rodea á los otros. Las longitudes de estos pares de varillas deben calcularse por los coeficientes de dilatacion del acero y del laton, de suerte que la suma de las dilataciones de los pares de acero sea precisamente igual á la suma de las dilataciones de los pares de laton.

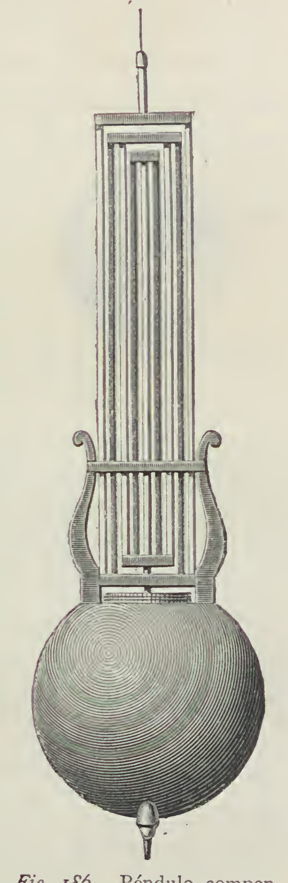


Fig. 186.—Péndulo compensador de rejilla

Si la longitud total del péndulo está representada por L, la suma de las longitudes de los pares de varillas de acero por F y la de las varillas de laton por C, tendremos $L = F - C$. Siendo K y K′ los coeficientes de dilatacion de los dos metales, para que haya compensacion, se deberá tener la igualdad $KF = K'C$, ó $K(L + C) = K'C$. De donde $\frac{C}{L} = \frac{K}{K' - K}$. Tomemos para K la cantidad 0,00001075 y para K′ 0,00001878, resultará $\frac{C}{L} = \frac{1075}{803} = 1{,}34$ próximamente. Em-

pleando cuatro varillas de laton como en la figura 185, la razon anterior da para cada una 0,67, ó sea los dos tercios de la longitud del péndulo. Pero si sólo se emplearan tres varillas de laton

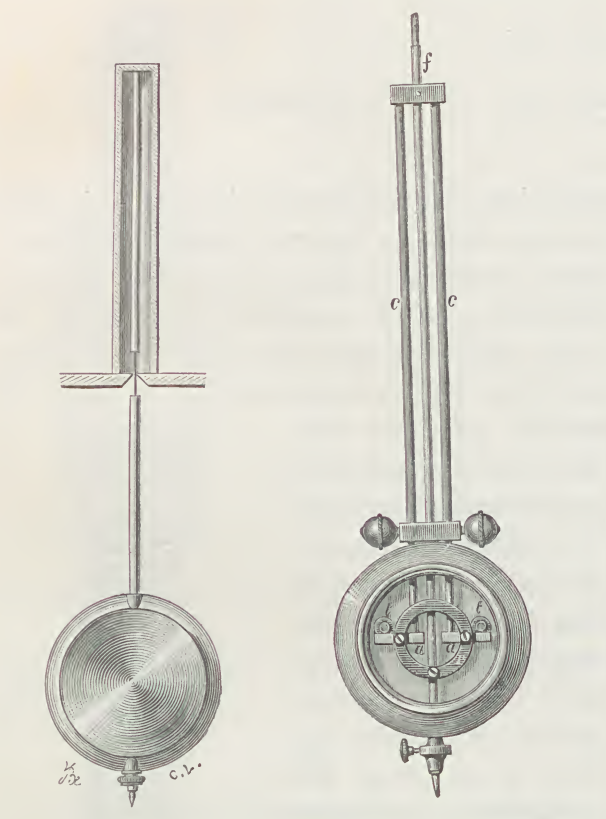


Fig. 187.—Compensador Leroy *Fig. 188.*—Compensador Brocot

ó tres de acero, la longitud de las primeras deberia exceder en un tercio de la del péndulo, lo que obligaria á adoptar una disposicion, ya que no imposible, por lo ménos muy incómoda.

Sin embargo, así se obtiene una compensacion aproximada, porque el centro de oscilacion de un péndulo compuesto no se confunde ni con el centro de gravedad del disco, ni con el de todo el aparato. Hay pues que regular esta compensacion, lo que se hace por tanteo mediante un tornillo puesto debajo del disco.

El *péndulo compensador de Leroy* (fig. 187) consiste en un tubo de laton soportado por un travesaño fijo sobre una abertura á bisel, que da paso á una varilla de acero suspendida del fondo del tubo, y que se compone de dos partes reunidas por una lengüeta de acero flexible á la altura de la ranura. La distancia de esta ranura al centro de oscilacion da la longitud del péndulo, puesto que allí está el verdadero punto de suspension.

Al dilatarse, el tubo de laton sube y el centro de oscilacion del péndulo sigue este movimiento. La varilla tiende, por el contrario, á bajar, concibiéndose que se hayan calculado las dimensiones respectivas de las partes del aparato de modo que haya compensacion. Esta se completa además por el método adoptado para el péndulo de rejilla y para todos los demás sistemas compensadores.

Haremos aún mencion de otros tres: el *compensador Brocot*, representado en la fig. 188, el *compensador Martin* (fig. 189) y el *compensador Graham* (fig. 190), que es el primer sistema adoptado para la compensacion de los péndulos.

En el primero de ellos, la varilla de hierro *f* que sostiene el disco está provista en su parte superior de un travesaño al cual van unidas dos varillas de laton *c,c,* que se dilatan libremente por sus extremos inferiores, los cuales á su vez se apoyan en dos palancas *a,a,* fijas al disco. Dichas palancas actúan sobre este por medio de unos ejes *t,t,* y lo levantan, de suerte que el centro de oscilacion propende á subir al propio tiempo que la dilatacion de la varilla de suspension tiende á bajarlo. De este modo queda efectuada en parte la compensacion; y sólo resta completarla por tanteo.

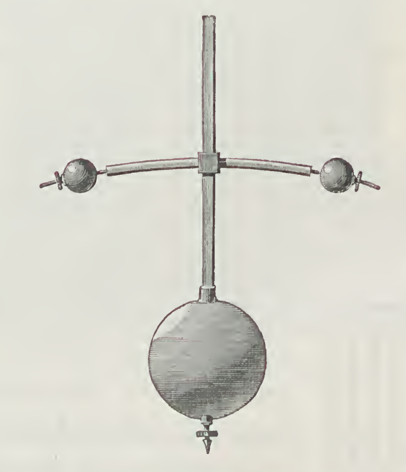
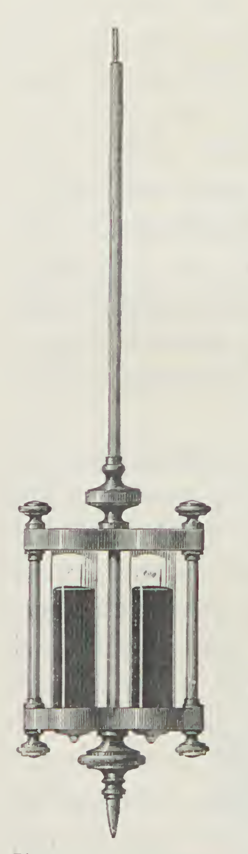


Fig. 189.—Compensador Martin

El péndulo Martin está representado en la figura 189. Es un péndulo comun, cuya varilla lleva dos láminas metálicas fijas en un punto de su longitud, desigualmente dilatables, soldadas una á otra y terminadas en dos bolas pesadas, de oro por ejemplo. Estando debajo el metal más dilatable, cuando la temperatura suba más allá del grado en que aún permanecen rectilíneas las varillas, estas se encorvarán, formando un arco con la concavidad vuelta hácia

arriba, y el centro de gravedad y por lo tanto el de oscilacion del péndulo, subirán con las masas; si la temperatura baja, el arco se formará en sentido contrario y el centro bajará. Compréndese que se hayan calculado las dimensiones y el peso de las piezas del sistema de modo que haya compensacion. Aparte de esto, las bolas de oro pueden correr por los tornillos que las sujetan, y llevándolas á un lado ú otro, es fácil acabar la compensacion por tanteo.


Fig. 190.—Compensador Graham

El compensador Graham está formado de una varilla de hierro que lleva en su parte inferior una placa en la cual descansan dos cilindros de cristal llenos en parte de mercurio. Miéntras la dilatacion da lugar á un alongamiento de la varilla de suspension, y baja por consecuencia el centro de oscilacion del péndulo, este resulta levantado por la elevacion del nivel del mercurio en los tubos á causa de la misma elevacion de temperatura.

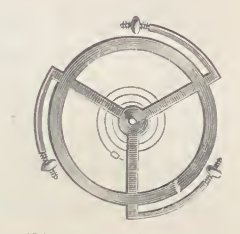
Usanse uno ó dos tubos; pero en todo caso se calcula del mismo modo la altura que debe darse al mercurio para compensar la dilatacion de la varilla de hierro, teniendo en cuenta á la vez la dilatacion del mercurio y la del cristal.

Graham suspendia su péndulo de una varilla de cristal en lugar de una de hierro, pero el principio y el cálculo eran los mismos.

Para hacer la compensacion más rigorosa, se quita ó se pone, segun las indicaciones de la experiencia, cierta cantidad de mercurio, ó bien se levanta ó se baja el péndulo por medio de un tornillo fijo en su parte inferior.

Hay además otros sistemas de compensacion de los péndulos, pero todos están basados en el mismo principio, esto es, en la desigualdad de dilatacion de los sólidos ó líquidos que los componen, y en una disposicion que levanta por un lado y baja por otro el centro de oscilacion.

El efecto de las variaciones de temperatura en los balancines de los cronómetros es análogo al que producen en los péndulos. Estos reguladores consisten en una rueda (fig. 191) puesta en movimiento por la accion de un muelle llamado *espiral*, resultando oscilaciones que deben ser perfectamente isócronas, pero como su duracion depende del radio del balancin, de su masa y de la fuerza del muelle, sucede que la dilatacion originada por el aumento de temperatura alarga dicho radio, y por tanto la duracion de la oscilacion: de suerte que el cronómetro atrasa. En cambio, adelanta cuando la temperatura está bajo el punto para el cual se ha regulado. Puede efectuarse la compensacion con unas planchuelas fijas en el contorno de la rueda y que llevan pequeñas masas metálicas, porque al dilatarse estas planchas adquieren mayor curvatura; las masas se acercan al centro, lo cual contrabalancea el efecto de crecimiento del radio.


Fig. 191.—Compensador de los cronómetros

II

MEDICION DE LAS LONGITUDES: CORRECCIONES EXIGIDAS POR LAS VARIACIONES DE TEMPERATURA

Cuando se necesita medir con gran precision la distancia entre dos puntos ó la longitud de la línea que los reune, es indispensable tener en cuenta los efectos de la temperatura en los instrumentos de que se hace uso, y especialmente en las reglas que sirven para este objeto y que por lo comun son metálicas. Por escaso que, á primera vista, parezca el efecto de la dilatacion en una varilla metálica de algunos metros de longitud, dista mucho de ser despreciable cuando se repite gran número de veces. En este caso se hallan las delicadísimas operaciones de la geodesia, cuando se ha de medir una base que debe servir de punto de partida en una complicada triangulacion. En el curso de una operacion de este género, la temperatura del aire puede variar un número notable de grados en un mismo dia ó en muchos dias consecutivos. La regla empleada sufre pues las dilataciones ó contracciones sucesivas que resultan de dichas variaciones; aparte de que el contacto de las manos de los operadores ó la proximidad de sus cuerpos puede tambien

modificar su temperatura. Por consiguiente, si no se hiciese caso de las temperaturas, se anotarian longitudes, ó mayores ó menores que la de la regla tomada como unidad, y la incertidumbre que resultara de estas desigualdades quitaria todo su valor al número definitivo, obtenido como medida de la base requerida.

Esto es lo que han comprendido perfectamente los sabios que, en varios países y en diferentes épocas, han acometido la medicion de arcos de meridiano ó de paralelo que debian servir para determinar la figura y dimensiones del globo terráqueo. Borda, Delambre y Mechain, Biot y Arago en Francia, Roy en Inglaterra, Plana y Carlini en Italia, y otros muchos geodestas han tomado todas las precauciones exigidas por semejantes determinaciones, introduciendo en sus resultados las correcciones formuladas primeramente por Borda en lo que á la influencia de la temperatura se refiere.

El metal escogido para las reglas era el platino á causa de su poca dilatabilidad. Cada regla de platino, de dos ó tres toesas de longitud, estaba cubierta de otra regla de cobre, algo más corta que la primera, y fija sobre ella por uno de sus extremos solamente. El otro extremo podia correr libremente sobre la doble toesa de platino, por efecto de un aumento de temperatura que dilataba el cobre en proporcion mucho mayor que el otro metal. Esta disposicion tenia por objeto formar con la doble regla un aparato termométrico capaz de marcar su propia temperatura. Hé aquí cómo:

Para graduar este termómetro, ó este *pirómetro*, como se le ha llamado, Borda introdujo sucesivamente la regla en hielo fundente y en un baño de agua hirviendo. Marcó con dos trazos los puntos á que el extremo libre de la regla de cobre llegó sobre el platino, y dividió en 100 partes iguales el intervalo que los separaba, correspondiendo cada una de las divisiones á un grado centígrado.

Suponiendo realmente efectuada esta division, bastaba sin duda, en la serie de las operaciones, leer con el anteojo la division en que se encontraba el índice así formado para tener en grados centígrados la temperatura de las dos reglas en el momento de la lectura. Conociendo el coeficiente de la dilatacion lineal del platino, era fácil entónces calcular la correccion que se debia hacer en la longitud de la regla, ó si se quiere, referir siempre esta longitud á una temperatura constante.

Partiendo de los números que expresan las dilataciones absolutas del cobre y del platino, entre 0° y 100°, vese que la dilatacion aparente del primer metal con relacion á la del segundo es próximamente la 1200.ª parte de su longitud. Suponiendo que la total de la regla de cobre á 0° es de 10 piés ó 1440 líneas, el intervalo de los dos puntos fijos debia ser sensiblemente igual á 1 línea y 2 décimas, ó sea algo más de $2^{mm},7$. Este pequeñísimo intervalo es el que hubiera habido que dividir en 100 partes iguales para poder apreciar, como hemos dicho ántes, una variacion de un grado centígrado en la temperatura. Limitábase á efectuar una division real, ya sea en 5, ó bien en 10 partes, y luégo á adaptar al extremo de la regla de cobre un vernier, merced al cual se podia leer con el microscopio las vigésimas ó las décimas de las divisiones trazadas (1).

Creemos que bastará lo que precede para dar una idea del ingenioso método merced al cual se ha podido tener en cuenta la influencia de la temperatura sobre la longitud, durante el curso de las operaciones necesarias para medir bases geodésicas. Añadiremos á esto el párrafo siguiente, tomado de Delambre, y que demuestra las minuciosas precauciones que han de adoptar los operadores cuando quieren evitar las causas de error y cerciorarse de la precision de sus medidas. Las reglas de que se valia aquel célebre geómetra eran como las que acabamos de describir: pero como su espesor (casi una línea) era demasiado reducido para que se las pudiera emplear solas y sin guarnicion, estaban puestas cada una sobre una pieza de madera perfectamente acoplada, en la cual estaba contenida entre pequeñas monturas que las mantenian sin estorbar su dilatacion. «Un techo cubria las piezas de madera, dice Delambre, con objeto de preservar las reglas de los rayos del sol, que hubieran producido en el cobre una dilatacion rápida, al paso que el platino, guarecido por el cobre, se hubiera caldeado mucho más despacio; de suerte que la marcha

(1) En muchas ocasiones hemos tenido que hablar del uso del vernier para medir pequeñas partes de una línea recta ó curva, cuando la longitud de estas partes es menor que la de una de las divi-

del vernier habria indicado algunos instantes una dilatacion absoluta y no una alongacion relativa. Pero en aquel techo se habian practicado unos orificios para que el observador pudiera ver continuamente las reglas y advertir cualquier desarreglo que ocurriera en ellas. De esto resultaba un inconveniente, y era que, por mañana y tarde, cuando el Sol tenia poca altura, el techo no interceptaba los rayos demasiado oblicuos, y para impedir que dieran en las reglas, hacia extender, pero sólo á la parte del Sol, una tira de lienzo sujeta al tejadillo y que reflejaba ó detenia los rayos.»

CAPITULO V

DESTILACION.—EVAPORACION

I

LA DESTILACION

Hay dos fases en la operacion á que se da el nombre de *destilacion*, la cual tiene por objeto separar un líquido de las materias extrañas que contiene en disolucion, ó de otro líquido con el cual se halla mezclado.

La primera fase consiste en reducir el líquido al estado de vapor por ebullicion. Si contie-

---

siones de la regla empleada. Para conocimiento de aquellos de nuestros lectores que ignoren el uso de este medio de valuacion y aproximacion, diremos en qué consiste.

Pongamos por ejemplo el caso en que se quiera medir la longitud buscada con *un décimo de diferencia* de la division menor de la regla. Sea LL′ (fig. 192) esta regla, y 0, 1, 2..... las divisiones trazadas en su arista. El vernier VV′ es una regla más pequeña cuya longitud total abarca nueve divisiones de la primera, y que está dividida exactamente en diez partes iguales, de suerte que una de sus divisiones equivale á los $\frac{9}{10}$ de una division de la otra.

Sea AB el extremo de la línea que se trata de medir, y sobre la cual se ha puesto la regla grande LL′; por hipótesis, la division 28 no

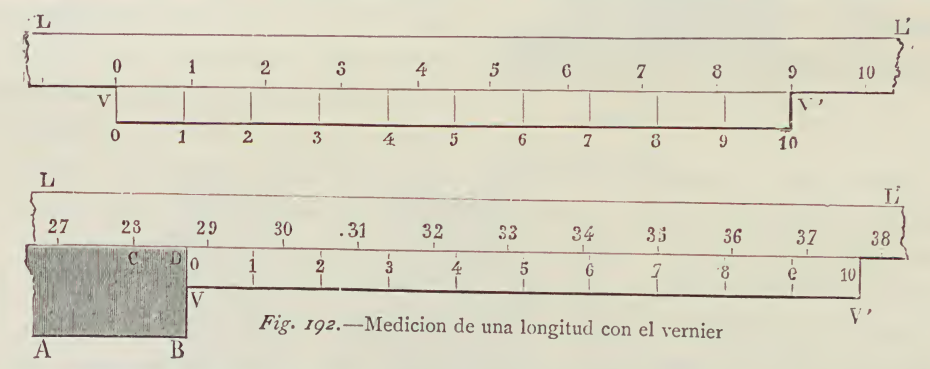


Fig. 192.—Medicion de una longitud con el vernier

llega más que hasta C, quedando aún por medir la porcion CD, menor que una de las divisiones. Para valuarla, se llevará el vernier VV′ más allá de los puntos B ó D y se examinará (con la lente si es necesario, porque aquí se han agrandado adrede las dimensiones de las divisiones de las dos reglas) qué trazo del vernier coincide con uno de la regla grande. En el grabado es el 7.º. De aquí se deducirá que la parte no medida CD vale 0,7, y por consiguiente, que la línea total que se trataba de medir tiene por longitud 28,7. Fácil es comprenderlo así, por cuanto el trazo 6 del vernier está 0,1 á la derecha del trazo 34, 0,2 á la del trazo 33, y así sucesivamente. El trazo 0 del vernier está pues 0,7 á la derecha de la division 28.

En la medicion de las bases geodésicas, se medían los intervalos de dos reglas sucesivas con el vernier *mn* (fig. 193), cuyas divisiones,

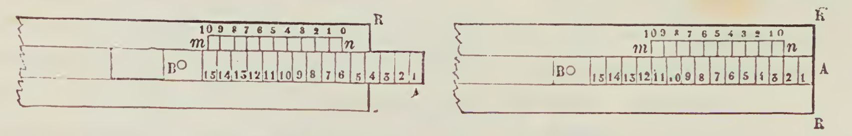
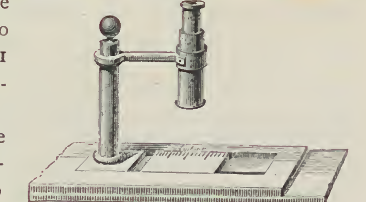


Fig. 193.—Medicion de una longitud con el vernier

trazadas en uno de los extremos, eran fijas. Una reglilla móvil de corredera llevaba las divisiones de la regla grande. Se corria esta reglilla hasta el punto requerido, y se leia fácilmente el número entero de estas divisiones en la parte situada más allá de RR: aquí es el 3. Buscando entónces el trazo del vernier que coincide con otro de la reglilla, se encuentra el n.º 7, y por consiguiente la porcion de intervalo medida era 3,7 con 0,1 de diferencia. En el grabado, es el trazo 2 de la reglilla el que coincidia primero con el cero del vernier y que ha avanzado á la derecha 3,7 divisiones. Lo propio sucede pues con el punto A.

La figura 194 presenta la colocacion de las dos reglas de cobre y de platino en el aparato de Borda para valuar la dilatacion aparente del cobre y de la temperatura correspondiente. Las divisiones estaban trazadas en una espiga fija en la regla de platino y móvil en una ranura practicada á lo largo de la regla de cobre. En el borde interior de la misma regla estaban trazadas las del vernier, cuyas indicaciones se leian con el microscopio fijo en la regla de cobre.


Fig 194.—Uso del vernier en el aparato de Borda

ne sustancias extrañas en disolucion, sales por ejemplo, como las hay en la mayoría de las aguas naturales, de fuente, de rio ó de mar, la parte acuosa es la única que se vaporiza; las sustancias extrañas quedan en el fondo de la vasija, y la separacion efectuada. Si está mezclado con otro líquido de diferente naturaleza, la ebullicion los separa tambien, en parte al ménos, puesto que la temperatura de ebullicion de líquidos diferentes no es la misma, y entónces uno de ellos se reduce á vapor ántes que el otro.

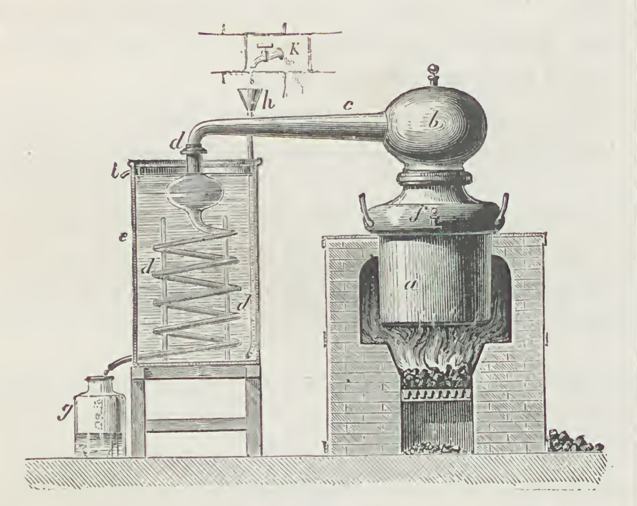


Fig. 195.—Alambique: aparato de destilacion

Como el objeto que se persigue en ambos casos es obtener con mayor ó menor pureza el líquido en cuestion, es preciso, despues de reducirlo á vapor, hacerle cambiar de estado ó volverlo á su estado primitivo. Este es el objeto de la segunda fase de la destilacion, el cual se consigue fácilmente condensando por enfriamiento el vapor producido.

La destilacion es una operacion industrial de muy antiguo conocida, que se lleva á cabo con un aparato llamado *alambique.*

Consiste en una caldera *a* llamada *cucúrbita,* sobre la cual hay una retorta *bc* á la que se da el nombre de *capitel* ó *montera.* Puesta sobre un hornillo y llena del agua que se ha de destilar, comunica por *d* con la parte del aparato llamada *serpentin* á causa de su forma espiral. El vapor que se forma por ebullicion sobre el agua de la cucúrbita pasa al serpentin y se condensa en él por efecto de su contacto con las paredes, continuamente enfriadas, de una tina en la que está metido el serpentin. El *agua destilada* sale de la tina cayendo en una vasija *g.* La condensacion incesante del vapor no puede efectuarse sino por el cambio del calor de vaporizacion y la elevacion de temperatura del agua de la tina *e.* Importa pues que se renueve el agua fria á medida que tiene lugar la destilacion, lo cual se consigue por la llave *k,* que lleva agua fria al fondo de la tina por el embudo y el tubo *hd,* miéntras el agua caliente sale por un tubo adaptado á lo alto de la tina.

Empléase el alambique á bordo de los buques para destilar agua de mar, y hasta cierto punto puede suministrar el agua dulce necesaria para las tripulaciones. El agua destilada de este modo viene á costar un céntimo el litro.

El aparato destilatorio es más complicado cuando los líquidos mezclados son desigualmente volátiles, como los alcohólicos. Con un alambique comun y á fuerza de destilaciones, se conseguiria sin duda destilar hasta cierto grado de pureza un líquido concentrado; pero este líquido, el alcohol por ejemplo, conservaria en este caso un gusto empireumático que conviene disipar. Esto se consigue con un aparato como el representado en la fig. 196, que vamos á describir sucintamente.

A es la caldera calentada directamente por el hogar; B otra caldera calentada por los gases perdidos de la combustion, cuyo calor se aprovecha de esta suerte. Dos tinas frigoríficas R, R′, contienen serpentines en los cuales se efectúa la condensacion del líquido que se destila. Este líquido, que es el vino por ejemplo, llena todas las partes del aparato, calderas y tinas. Introdúcesele primeramente en la tina R′, pasa por un tubo á R, de allí por el tubo *a* á la caldera B y por el *t* á la A. El vapor sigue una marcha precisamente contraria. De A pasa por *t′* á la caldera B; de esta, por *b,* sube á R donde se condensa en parte en una serie de roscas de hélice: el líquido condensado vuelve á B por el tubo de retorno *c* comun á las hélices; y la parte no condensada del vapor pasa al serpentin de R′ donde se condensa á su vez.

Hé aquí cómo se efectúa la operacion. Cuando el líquido ha llegado en la caldera B al nivel de la boquilla de regadera, se suspende su entrada, se llena la caldera A en sus tres cuartas partes, y se la caldea. Entónces, miéntras la parte más alcohólica corre por el serpentin, la más acuosa vuelve á B cuyo nivel aumenta

al paso que el de A baja. Cuando este último queda reducido á la cuarta parte, se vierte por la espita de evacuacion el residuo ó *vinaza.* Abrese la espita *t*, y A se llena á expensas de B, despues de lo cual se vuelve á introducir líquido por *r*, sin interrumpir ya su entrada, hasta que B, que recibe líquido de tres partes, se llena de nuevo y A se reduce como ántes.

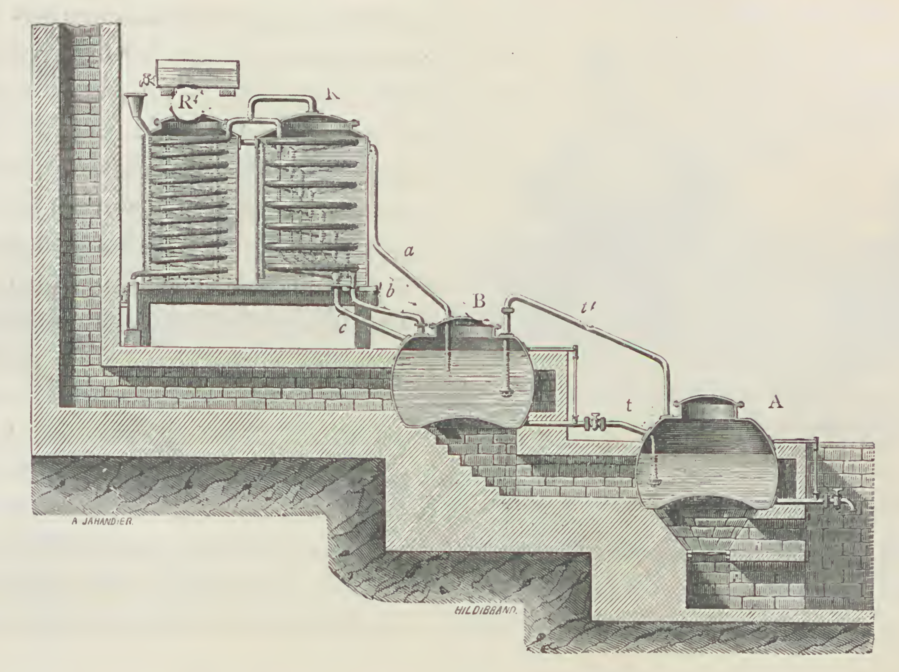


Fig. 196.—Aparato Laugier : destilacion del alcohol

En seguida se vuelve á empezar la operacion, y así sucesivamente.

La destilacion del vino, así como la de todos los líquidos fermentados sacados de los cereales, como trigo, centeno, cebada germinada, maíz, patatas, remolachas, etc., ha adquirido

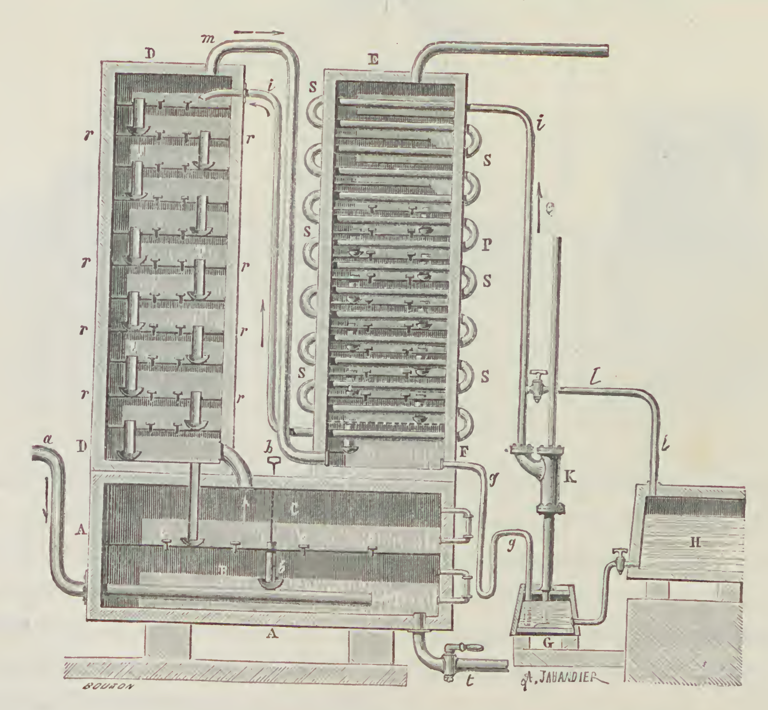


Fig. 197.—Aparato Coffey para la destilacion del alcohol

gran desarrollo en todos los países de Europa y de América: es la operacion terminal de una industria considerable, la fabricacion del alcohol. Los aparatos destilatorios son muy variados: en Francia y en Bélgica, además del aparato Laugier, que acabamos de describir, se usan los de Cail y de Champonois; en Alemania, los de Dorn, Gall y Siemens; y en Ingla-

terra, el de Coffey, representado en la figura 197 (1). En el *Diccionario de Química* de Wurtz puede verse la descripcion de estos aparatos, cuyo principio físico bastaba dar á conocer aquí.

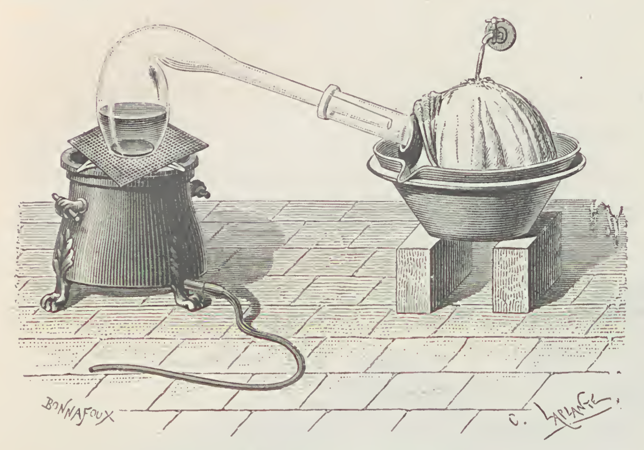


Fig. 198.—Aparato destilatorio

Los aparatos de que acabamos de tratar se usan en la grande industria que tiene por objeto la destilacion y rectificacion de alcoholes. En los laboratorios de química, donde con frecuencia se necesita purificar un cuerpo volátil y separarlo de las partes fijas que contiene en disolucion, se recurre á la destilacion, y los aparatos que para esta sirven son bastante sencillos, como se ve por las figs. 198 á 202. Unos globos de vidrio A y C, unidos por unos tubos que hacen las veces de serpentin y que durante la operacion están rodeados de una corriente continua de agua fria, son las piezas esenciales, cuyas dimensiones, forma y materiales empleados para enlazarlos varían con la naturaleza y la cantidad del líquido, con su mayor ó menor volatilidad y con su accion química sobre la materia de las vasijas y de los tubos. Si, por ejemplo, se trata de líquidos corrosivos, que atacan los compuestos orgánicos, no se deberá hacer uso de corcho ni de cautchuc en el aparato, y se harán las ensambladuras con piezas de vidrio esmeriladas ó no, segun los casos.

Acontece con ciertos cuerpos que no puede

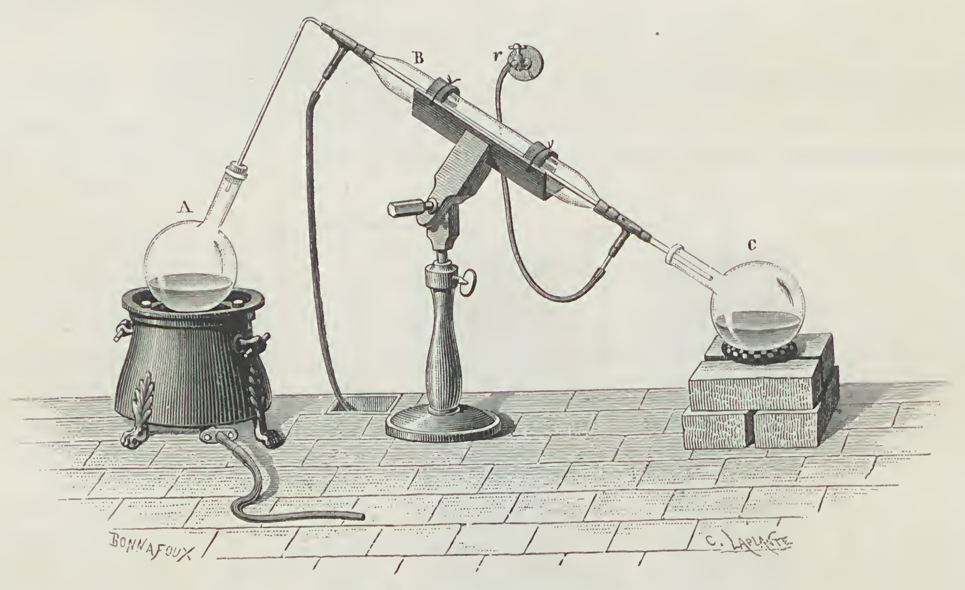


Fig. 199.—Aparato destilatorio

efectuarse la destilacion á la presion ordinaria porque la temperatura á que es preciso someterlos los descompone parcialmente. En este caso, se opera á una presion menor y hasta en el vacío. La figura 200 muestra cómo se prepara el aparato. Se hace uso de un globo en calidad de generador, calentándolo en un baño de aceite, y el producto de la destilacion se recoge en una probeta metida en un vaso de agua fria; esta probeta está en comunicacion con una gran redoma que comunica á su vez con una máquina neumática, y que sirve para regularizar la presion. Tan luégo como se ha hecho el vacío al grado conveniente, se cierra la llave de comunicacion y se deja efectuar la destilacion.

Cuando se quiere separar los líquidos desigualmente volátiles de que consta una mezcla,

(1) «Para dar una idea de las dimensiones de un aparato de Coffey, bástanos decir que los Sres. Currie, de Bow, cerca de Lóndres, obtienen en ellos anualmente 4.775,000 litros de alcohol á 65 grados *(overproof)* por la destilacion del mosto fermentado de cebada y de avena con adicion de malto. Esta sola casa paga al Estado más de 400,000 libras esterlinas (10 millones de pesetas) de derechos por año.» *(Diccionario de Química*, art. *Alcohol.)*

tambien se recurre á la destilacion, saliendo el experimento tanto mejor cuanto mayor intervalo media entre los puntos de ebullicion de estos líquidos. Sin embargo, la separacion no

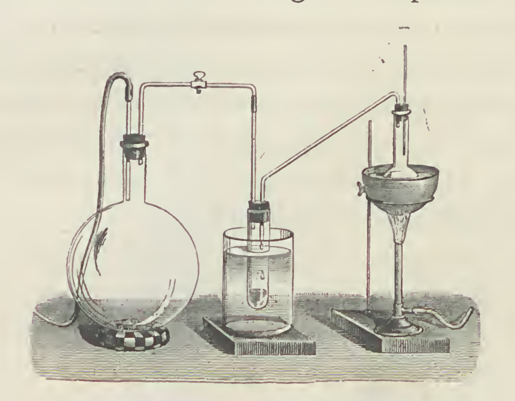


Fig. 200.—Aparato para destilar en el vacío

suele ser muy completa, y si se hacen tres partes del producto de la destilacion, la primera que se recoja será la que contenga mayor proporcion del líquido más volátil; en cambio la última será más rica en partes del líquido que tenga el punto de ebullicion más elevado, y la porcion media tendrá más afinidad con la mezcla primitiva. Procediendo entónces del mismo modo con las dos fracciones extremas, se obtendrán de nuevo dos mezclas todavía más ricas en cada uno de los dos líquidos, y así sucesivamente hasta que se llegue á una separacion casi total. Esto es lo que se llama *destilacion fraccionada.*

Este modo de operar no siempre tiene buen éxito á la presion ordinaria, y entónces se apela al método de destilacion en el vacío, tal cual lo hemos descrito ántes. Supongamos que se desea destilar una mezcla de alcohol y de éter; la cantidad del primero que pasará á la destilacion será tanto menor cuanto más baja la temperatura á que se efectúe, y como la disminucion de presion tiene precisamente por objeto bajar el punto de ebullicion, de aquí la utilidad de hacer en el aparato destilatorio un vacío más ó ménos perfecto.

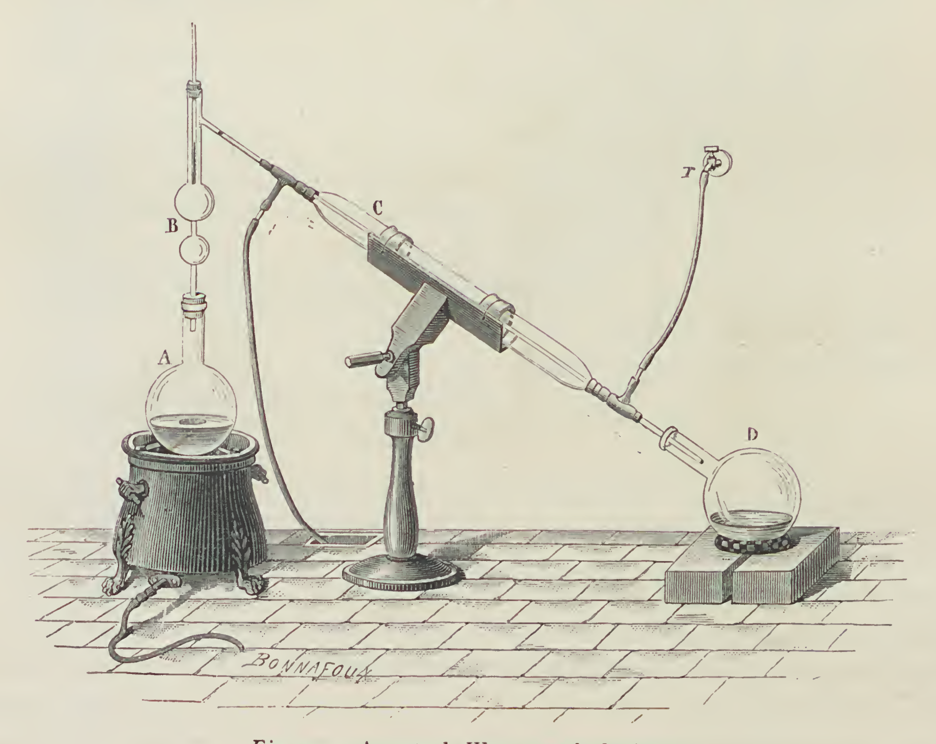


Fig. 201.—Aparato de Wurtz para la destilacion

Se consigue tambien el mismo objeto disponiendo los aparatos de un modo especial. Una de las disposiciones más sencillas es la que representa la fig. 201, y cuyo autor es M. Wurtz. Consiste en un tubo bastante grueso en cuya longitud se han soplado dos bolas B y soldado un tubo lateral, adaptándole además á la redoma A que sirve de generador. El vapor que lo atraviesa se condensa parcialmente en la superficie interna de las bolas y vuelve al globo, al paso que la parte más volátil, dirigiéndose por el tubo lateral, se condensa en el frigorífico C, para encaminarse desde él al recipiente D. De este modo, con una sola destilacion se puede separar una mezcla mucho mejor que con una retorta ordinaria, pero es preciso caldear más,

porque una gran parte del líquido vuelve al generador ántes de quedar destilado definitivamente.

Cuando se quiere concentrar soluciones á baja temperatura, se usa la destilacion en el vacío y entónces se emplea el aparato representado en la fig. 202. Hé aquí la significacion y el objeto de sus diferentes partes: A redoma que contiene la solucion; B tubo frigorífico; F recipiente puesto en comunicacion por un tubo de goma con el tubo de vacío T; *m* manómetro que indica el grado de vacío; B frasco que sirve para alimentar la redoma A por medio del sifon de espita *l*.

Cuando se quiere conocer la riqueza alcohólica de un vino, tambien se apela á la destilacion. Mediante operaciones muy sencillas y aparatos discurridos por Gay-Lussac y Salleron, se reduce el vino á una mezcla de agua y alcohol,

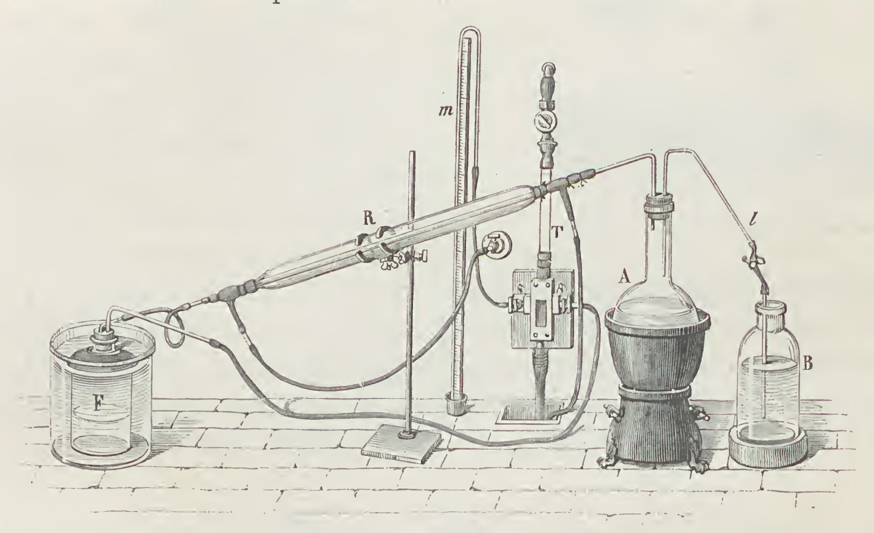


Fig. 202.—Aparato para la concentracion de las soluciones en el vacío

quedando separados del vino todos los demás principios que entran en su composicion, como sales, ácidos, tanino, materias colorantes, etc. En seguida, introduciendo el alcoholómetro centesimal en la mezcla, se puede, en virtud de un cálculo sencillo, conocer por él la riqueza en alcohol del vino sujeto al experimento.

II

EVAPORACION.—MARISMAS Y SALINAS.—ALCARRAZAS.—FABRICACION DE HIELO EN BENGALA

Una gran parte de la sal que consumimos procede de las aguas del mar, en las cuales entra en la proporcion de $^1/_{40}$ á $^1/_{34}$ próximamente (1). Por medio de la evaporacion al aire libre, y en anchos estanques poco profundos, se consigue concentrar poco á poco el agua marina y la sal se deposita en forma de cristales en el fondo de los estanques, y en la de tenue capa sólida en la superficie del agua. La elevacion de temperatura causada por los rayos solares así como el viento activan la evaporacion, y por consiguiente durante el verano es cuando se recoge la sal en las marismas y se ejecuta la serie de manipulaciones sencillas que constituyen esta industria. Se forman montones con la sal, dejándola al aire algun tiempo, para que se disuelvan las sustancias delicuescentes que están mezcladas con ella; y una vez seca, se entrega al comercio.

Las figuras 203 y 204 representan el plano de dos marismas: el primero indica la posicion adoptada en las costas de la Mancha y del Océano, en donde se aprovechan las mareas para llenar, en las horas de la pleamar, el gran estanque cuyo nivel domina el de los otros estanques de la marisma. El agua pasa de él á las *conchas*, compartimientos rectangulares (4, 5), de donde pasa á otros más pequeños, siguiendo el camino indicado por las flechas (6, 6, 6, 7). Al llegar á estos, penetra por unos canalitos en los cristalizadores (8, 9). Cuando la estacion (de mayo á setiembre) es favorable, la concentracion de la sal en los estanques pequeños se efectúa con facilidad y la sal se deposita en cristales en los cristalizadores. Se la recoge en montoncillos, depositándolos en los *puentes* ó

(1) Esta proporcion varía de un mar á otro. El número 1/34 es relativo al agua del Mediterráneo; 1/40 á la del Océano Atlántico: en el mar de Azof el agua apénas contiene más de 1 céntimo de sal marina. En estos números no están comprendidas las demás sustancias fijas en el agua de mar, como los cloruros de magnesio y de calcio, los bromuros de magnesio y de sodio, etc.

diques que separan los compartimientos de los cristalizadores. Cuando estos montoncillos se secan se forman con ellos montones mayores TT, cubriéndolos con una capa de greda. La sal que se obtiene así es la sal *gris:* se la refina disolviéndola en agua, y precipitando la magnesia por la cal: despues de filtrarla, se evapora la disolucion en calderas.

Las *salinas* del Mediodía tienen distinta distribucion que las del Oeste por no haber mareas en el Mediterráneo. Están divididas en dos ó tres pisos: el agua llega por una pendiente natural á los exteriores (3, 3) donde sufren una concentracion; de allí se la hace pasar á los estanques (4, 4) ó pisos interiores, y por fin de estos á los estanques de depósito (5, 5). En lugar de elevar primeramente el agua á los estanques del piso más alto, para conducirla desde allí á los inferiores, se adopta el método inverso, porque evidentemente requiere menor fuerza motriz, pues la cantidad de agua que se ha de elevar va disminuyendo á medida que la evaporacion la concentra. En el grabado (2, 7) se ven las bombas de vapor que sirven para estas elevaciones sucesivas.

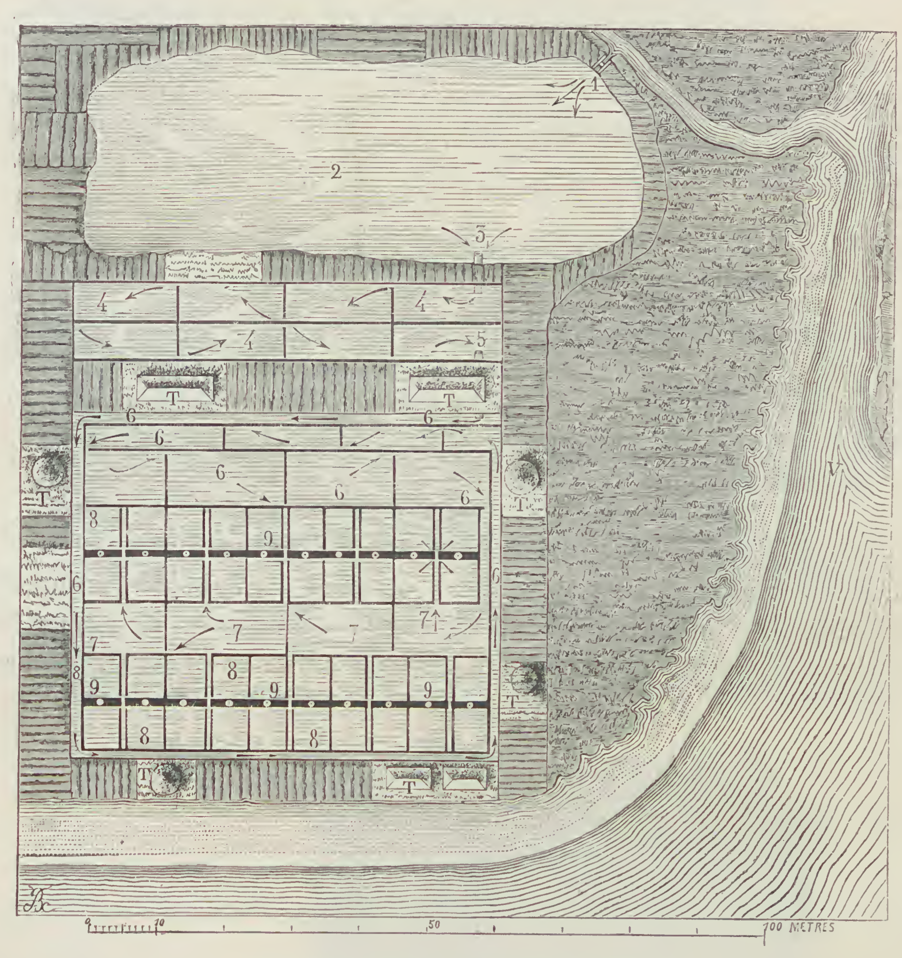


Fig. 203.—Plano de una marisma del Oeste

Tambien se recolecta sal extrayéndola por evaporacion de las aguas de los manantiales salinos; pero como la proporcion de sal que por lo comun contienen estas aguas es escasa, se empieza por concentrarlas haciéndolas pasar por una primera evaporacion al aire libre, despues de lo cual se termina la evaporacion sometiendo las aguas concentradas á la accion del calor. La sal se deposita en las calderas donde se efectúa esta segunda operacion.

La evaporacion de las aguas salinas al aire libre se efectúa del modo siguiente: En un armazon puesto sobre el estanque en el que han de penetrar las aguas se apilan haces de ramaje; aquellas salen por una serie de caños *a, a...* de dos artesas AB, CD, situadas en la parte superior de dicho armazon, al cual se da el nombre de *edificio de graduacion*, y que se orienta de modo que su direccion longitudinal sea perpendicular á la del viento más frecuente. El agua corre diseminándose al través del ramaje, de

suerte que tiene que presentar una gran superficie al aire libre: la evaporacion se efectúa pues con gran rapidez, y el agua del estanque es más concentrada que la de las fuentes. Con unas bombas P, P′, se la vuelve á subir, hasta que el grado de concentracion sea suficiente, y se termina la operacion en las calderas.

Conocidas de todos son esas vasijas de tierra

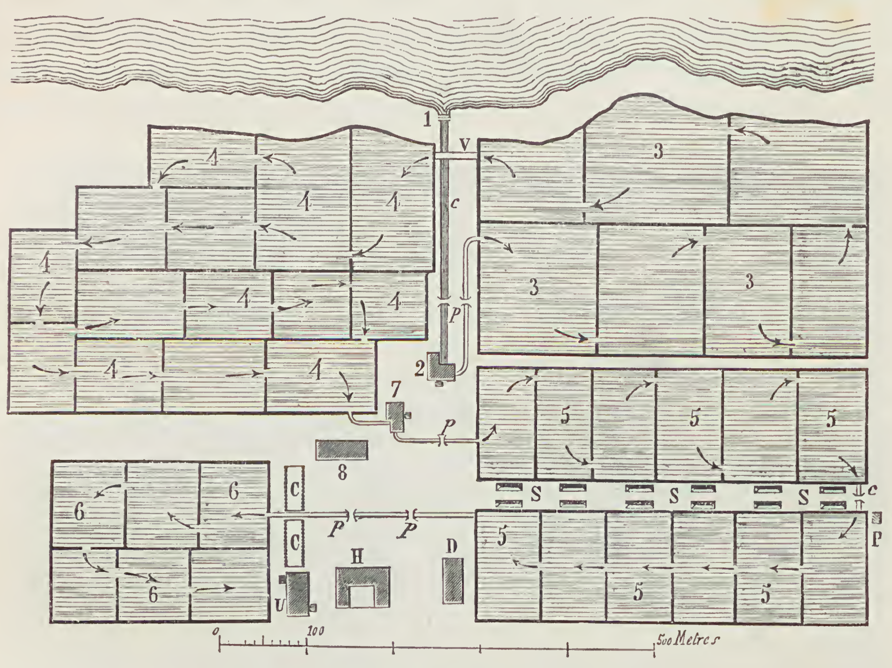


Fig. 204.—Plano de una salina del Mediodía

porosa llamadas *alcarrazas*, que sirven para refrescar el agua en verano. La propiedad que las distingue se debe al frio que resulta de la evaporacion del líquido en la superficie exterior. El agua que rezuma por las paredes, y que se evapora con tanta mayor rapidez cuanto ménos

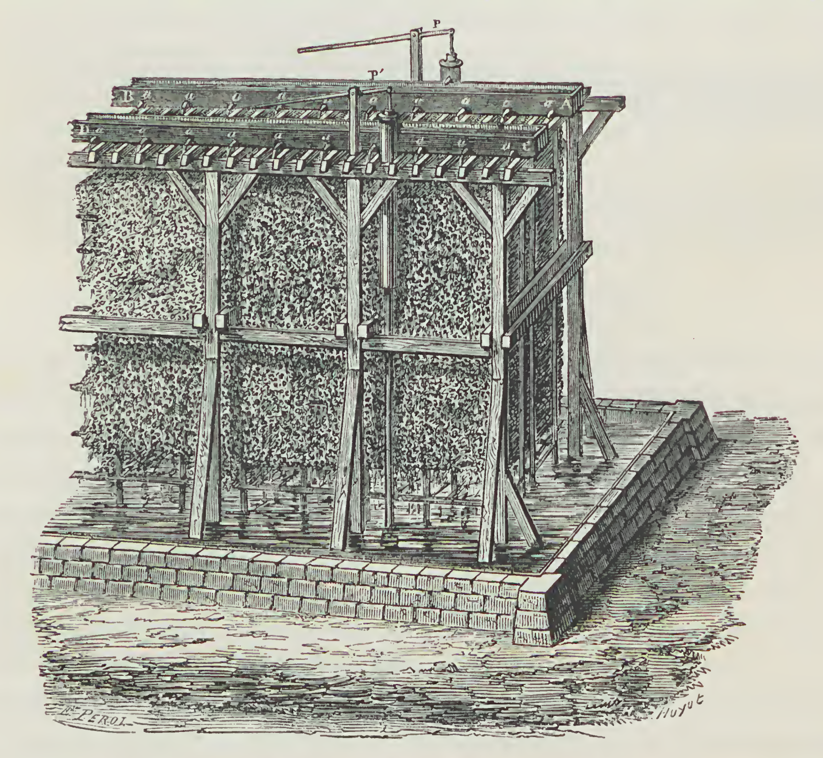


Fig. 205.—Edificio de graduacion para la evaporacion de las aguas salinas

saturado de vapor está el aire exterior, más cálido, se reemplaza sucesivamente con agua nueva. El descenso de temperatura que resulta de esta evaporacion impide que el agua de la alcarraza se caliente, como sucederia si las paredes de la vasija fuesen impermeables.

Esta evaporacion, tan abundante y rápida en las noches claras, es la que motiva la formacion del rocío, que es la condensacion del vapor de agua del aire, en diminutas gotas, en la superficie de los cuerpos terrestres. Cuando el frio que de ella resulta es bastante intenso, las gotas se hielan y producen la escarcha. En Bengala, donde la temperatura es bastante elevada para que nunca pueda formarse hielo naturalmente, se le obtiene artificialmente. Hé aquí en qué términos explica Tyndall el medio usado, y la causa del fenómeno físico de que este medio es una aplicacion.

«Wells (autor de la *Teoría del rocío*) fué el primero que explicó la produccion artificial del hielo en Bengala, donde jamás se forma naturalmente. Allí se abren zanjas poco hondas que se llenan de paja, y sobre esta se ponen al aire libre en las noches serenas unas fuentes planas con agua préviamente hervida. El agua tiene gran poder de radiacion; despide en abundancia su calor al espacio, y el calor perdido de este modo no puede ser reemplazado por el calor de la tierra, pues la paja, no conductora, lo detiene á su paso. Aún no ha salido el sol cuando ya está formado el hielo en cada vasija.



Fig. 206.—Trasporte de hielo americano en Bombay

Tal es la explicacion de Wells, sin duda la verdadera; pero creo que necesita un complemento. Segun las descripciones llegadas hasta nosotros, parece que la condicion más propicia para la formacion del hielo no es solamente la pureza del cielo, sino tambien la sequedad de la atmósfera. «Las noches más á propósito para que se forme el hielo, dice sir Roberto Baker, son las más claras y serenas y durante las cuales *aparece muy poco rocío despues de media noche*. Nótese que he escrito de cursiva esta frase significativa. Para que se produzca hielo en abundancia, no sólo debe estar despejada la atmósfera, sino que además ha de estar comparativamente privada de vapor de agua. Cuando la paja en que descansaban las fuentes se humedecia, se la reemplazaba con paja seca; y la razon que daba Wells para justificar esta costumbre, es que la paja mojada, y por lo mismo más compacta, obraba como cuerpo conductor. Puede ser; pero tambien es cierto que al salir el vapor de agua de la paja húmeda y al esparcirse por encima de las fuentes, habria hecho las veces de una pantalla que hubiera detenido el enfriamiento por radiacion y retardado la congelacion.»

Las cantidades de hielo que se recogen de este modo, ántes del alba, en las fuentes expuestas á la radiacion no son muy considerables, como se comprenderá. Segun dice L. Rousselet en una narracion en que da cuenta del modo de obtener el hielo en la India, «á menudo se reduce á una tenue película, pero todos estos fragmentos combinados llegan á formar un hielo bastante compacto, el cual se trasporta inmediatamente á unas neveras abiertas en el suelo, donde se conserva bastante tiempo.»

Este método para formar y recoger hielo está sujeto á inconvenientes que hacen preferible el

hielo en grandes masas, tal cual se recibe en las Indias directamente de los lagos Hudson y Ontario. El primero está siempre mezclado con paja y polvo, lo cual impide emplearlo directamente para refrescar las bebidas, y únicamente sirve para mantener á baja temperatura las vasijas que contienen los líquidos. Aparte de esto, la cantidad que se puede obtener por la evaporacion natural ó al aire libre, dista mucho de bastar para las necesidades crecientes del consumo de hielo, de uso tan general hoy dia en las naciones civilizadas.

En efecto, no tan sólo sirve el hielo para refrescar en verano toda clase de bebidas y para hacer sorbetes, sino tambien en medicina y cirugía para el tratamiento de ciertas enfermedades ó para curar heridas (1); así es que su consumo es grande en Europa y en las demás partes del mundo. Se le recoge en grandes fragmentos en Rusia, en Suecia y en Noruega, en el Canadá en la superficie de los lagos, y se trasporta por mar á los países meridionales, como acabamos de decir que los americanos lo exportan á la India. Para trasportar dichas masas sin que las derrita la temperatura más suave de las regiones que ha de atravesar, se le apila en cajones, por capas rodeadas y separadas con aserrin, bastando la escasa conductibilidad de esta materia para conservar el hielo durante su viaje. A su llegada, se le acondiciona en neveras, de las cuales se le extrae á medida que se va necesitando.

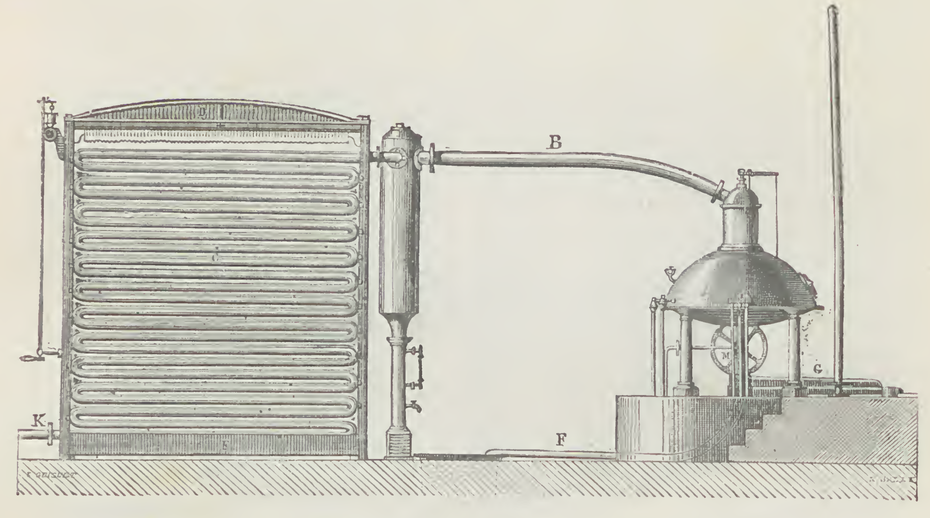


Fig. 207.—Aparato Derosne y Cail para la concentracion de melazas

En la fabricacion del azúcar de remolacha, cuando se ha purificado y filtrado el jugo, debe pasar este por una fuerte concentracion, á fin de que el azúcar disuelto pueda cristalizarse. Esta concentracion se efectúa en dos operaciones, la primera de las cuales consiste en reducir el jugo por evaporacion á cosa de la mitad de su volúmen primitivo, y á trasformarle en *melaza.* 100 kilógramos de jugo dan por término medio 26 de melaza, de suerte que se evaporan 74 de agua. En otro tiempo se caldeaba el jugo en calderas abiertas y por consiguiente á la presion de la atmósfera. En estas condiciones, si la temperatura era muy elevada, originaba un grave inconveniente; por efecto del calor, el líquido se coloraba de pardo, indicio de la trasformacion de una parte de azúcar cristalizable en azúcar no cristalizable. Para obviar este inconveniente, se han inventado aparatos en los cuales se hace la concentracion á presion inferior ó en el vacío, resultando de aquí que la temperatura de ebullicion de los jugos es ménos elevada, y no inspira recelo sobre la alteracion del azúcar, aparte de que la concentracion es más rápida, y por lo mismo más económica. Las figuras 207 y 208 representan dos de los aparatos basados en este método de evaporacion y principalmente usados en Francia.

En el aparato Derosne y Cail, A es la caldera que contiene la miel que se ha de concentrar:

---

(1) «El hielo, dice M. Buignet, es uno de los recursos más preciosos de que la terapéutica puede disponer para producir los efectos de la medicina sedativa. El frio que produce da muy buen resultado en los casos de inflamacion ó de hemorragia, en las meningitis, en las fiebres tifoideas de forma cerebral, etc. Es por tanto necesario que el farmacéutico tenga siempre cierta provision de hielo por vender, tanto en invierno como en verano, y lo mismo en las poblaciones que cuentan con neveras, que en las localidades privadas de recursos; y á falta de hielo natural, es menester que proporcione hielo fabricado artificialmente.» *(Manipulaciones de física.)*

el vapor producido pasa por el conducto B á un serpentin de cobre C, contenido en la parte media de una gran tina. La miel fria corre por las espiras del serpentin de un depósito superior D,

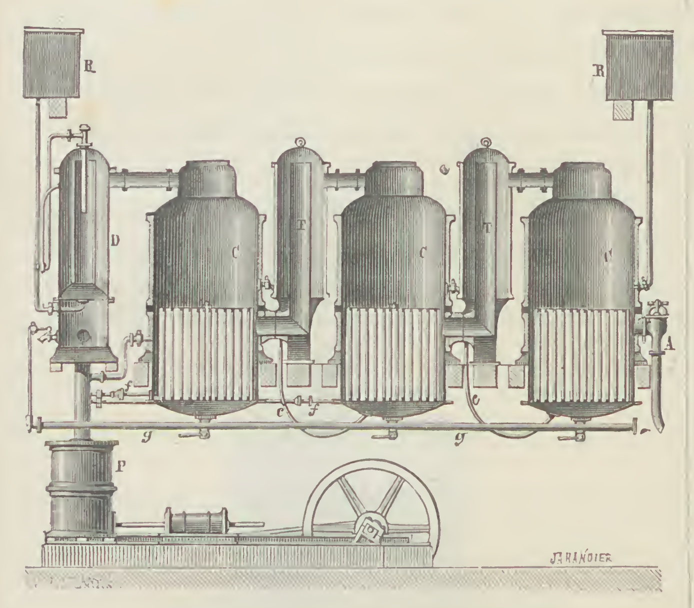


Fig. 208.—Aparato de triple efecto de Cail

baja la temperatura del vapor y facilita así la ebullicion. Esta miel se calienta á su vez y cae en el depósito inferior E, desde el cual va á parar á la caldera. El extremo K del serpentin está en comunicacion con una bomba que aspira aire y hace así el vacío en el interior de la caldera, lo cual baja la temperatura de ebullicion del líquido.

El aparato de triple efecto de Cail (fig. 208) se compone de tres calderas verticales CCC, de la misma altura, cuyo interior está dividido por tabiques horizontales en tres compartimientos desiguales. Varios tubos verticales (60 ú 80) ponen en comunicacion los compartimientos inferior y superior, haciendo que la miel que se ha de evaporar pase libremente de uno á otro. La miel no puede pues penetrar en el compartimiento del medio por el cual circula el vapor que sirve para caldear las calderas. La bomba P hace el vacío en la primera caldera de la derecha, reduciendo en un cuarto la presion atmosférica. El jugo pasado del depósito R á esta caldera entra en ella en ebullicion á 80° ó 90°. El vapor que despide pasa á un depósito ó llega á un tubo T, desde el cual penetra en otra caldera, donde caldea la miel, que entra en ebullicion entre 50° y 60°. Del mismo modo pasa á la tercera caldera, para ir á concentrarse en D, en contacto con el agua fria que llega por unos tubos. Esta condensacion contribuye á mantener el vacío en las calderas, vacío cuyo grado va creciendo de la primera á la tercera, de lo cual resulta tambien el descenso de la temperatura de ebullicion en las calderas sucesivas.

CAPITULO VI

PRODUCCION INDUSTRIAL DEL FRIO

I

MEZCLAS FRIGORÍFICAS

El sistema usado en la India para proporcionarse escasas cantidades de hielo no puede seguirse en todas partes ni en todas las estaciones. Además, la recoleccion de hielo natural en los estanques ó lagos depende de lo más ó ménos rigoroso del invierno en los países en que aquella es posible. Las masas se han de trasportar en seguida, á gran coste, á los puntos de consumo, y se las deposita en las neveras de donde se las saca conforme se van necesitando. Todo esto exige gastos que hacen bastante caro el precio de un kilógramo de hielo. Así es que se han arbitrado medios de fabricarlo artificialmente y sistemas bastante económicos para hacer esta fabricacion verdaderamente industrial, cuestion práctica que se relaciona con el problema mucho más general de la produccion del frio, del que desde luégo diremos algunas palabras.

En el capítulo de la Primera Parte que trata de la liquefaccion de los gases hemos visto que se puede hacer que baje mucho la temperatura ya mediante la evaporacion rápida de un líquido sometido á débil presion, ó ya por la brusca expansion de un gas fuertemente com-

primido, ó bien por el contacto con una mezcla de sustancias químicas, una de las cuales por lo ménos sea sólida y sufra la fusion por efecto de su afinidad con la otra. Como se ve, en todos estos casos se trata de una absorcion de calor más ó ménos grande, absorcion exigida por el trabajo mecánico que requiere todo cambio de estado. Como los cuerpos en que este ocurre no pueden suministrar inmediatamente dicha cantidad de calor, la toman del medio ambiente, cuya temperatura baja por tal causa más ó ménos.

A uno de los expresados modos de produccion del frio han recurrido los que han ideado procedimientos de fabricacion del hielo. Hablemos ante todo del uso de las mezclas frigoríficas de que los químicos y físicos se valen há largo tiempo en sus laboratorios, y que son en bastante número. Mencionemos algunas de las más usadas:

2 partes en peso de hielo machacado ó de nieve con 1 parte de sal marina (ó cloruro de sodio); ambas sustancias toman el estado líquido, y el termómetro metido en la disolucion baja á 19 y áun á 20° bajo cero.

3 partes de hielo machacado ó de nieve, mezcladas con 4 partes de cloruro de calcio, pueden llegar á un frio de—50°.

En ambas mezclas, son dos las causas del enfriamiento. La afinidad del agua líquida para con una ú otra sal determina la doble liquefaccion, y para que esta pueda efectuarse, el agua ha de liquidarse ante todo. De aquí resulta una primera absorcion de calor, exigida por el trabajo mecánico de la fusion del hielo ó de la nieve, y luégo otra, producida por la liquefaccion de las sales.

Otra mezcla frigorífica usada con frecuencia es la que se forma con 8 partes de sulfato de sosa cristalizado y 5 de ácido clorhídrico concentrado: el sulfato de sosa ha de estar reducido á polvo tenue. Vésele deshacerse rápidamente, y el termómetro sumergido en esta mezcla desciende á unos 27° bájo su temperatura inicial. En este caso el descenso de temperatura dimana de varias causas, y en especial de la liquefaccion del agua de cristalizacion del sulfato de sosa (1).

Hé aquí otras mezclas de una sal con un ácido:

3 partes de sulfato de sosa y 2 de ácido nítrico diluido; enfriamiento 29°.

9 partes de fosfato de sosa y 4 de ácido nítrico diluido; enfriamiento 39°.

6 partes de sulfato de sosa, 5 de nitrato de amoniaco y 4 de ácido nítrico diluido; enfriamiento 36°.

Por último, sabemos que el nitrato de amoniaco es una sal blanca, sólida, que cristaliza perfectamente y es muy soluble en el agua. Si se hace una mezcla de 1 parte de esta sal, finamente pulverizada, con 1 parte de agua destilada, la fusion se efectúa casi instantáneamente, ocasionando un descenso de 20° bajo la temperatura ambiente. Si esta es de 10°, el frio producido es de 16° bajo cero.

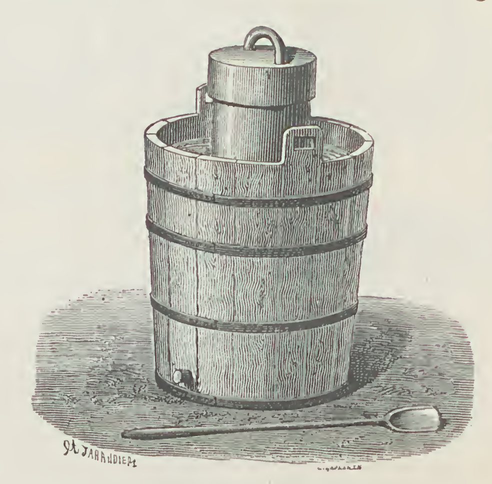


Fig. 209.—Garapiñera

Veamos ahora algunas aplicaciones industriales ó domésticas de las mezclas frigoríficas. Las figuras 209 á 212 representan algunos aparatos muy sencillos en que estas se utilizan.

Una mezcla de hielo machacado y de sal, contenida en un cubo en el que se introduce el utensilio donde están los líquidos que se han de congelar, ó segun la expresion técnica, trasformar en horchatas ó sorbetes, constituye el más sencillo de dichos aparatos: es la *garapiñera*.

(1) Segun M. Berthelot, «las mezclas frigoríficas constituidas por sales hidratadas, asociadas á los ácidos, á las bases ó á otras sales, se rigen por la teoría siguiente: el fenómeno anormal que estas mezclas presentan resulta del concurso de las energías químicas con energías extrañas. Las primeras actúan conforme al principio del trabajo máximum para producir una primera reaccion exotérmica, de que son consecuencia todas las otras. En seguida intervienen las energías caloríficas en sentido inverso para dar lugar á una absorcion de calor, bajo su cuádruple forma de disociacion (sulfato de sosa hidratado), de disgregacion por el disolvente (equilibrio entre el bisulfato de sosa y el agua), de disolucion (la cual solo desempeña un papel intermedio si se mezcla sulfato de sosa y ácido clorhídrico concentrado), y en fin, de la liquefaccion (agua de cristalizacion).»

Las figuras 210, 211 y 212 representan *congeladores domésticos*, todos ellos construidos y basados en ese principio: frio producido por la disolucion, que se activa, ya con un movimiento oscilatorio, ó ya con uno de rotacion dado al líquido frigorífico, mediante un manubrio, con paletas en hélice que rodean la vasija llena del

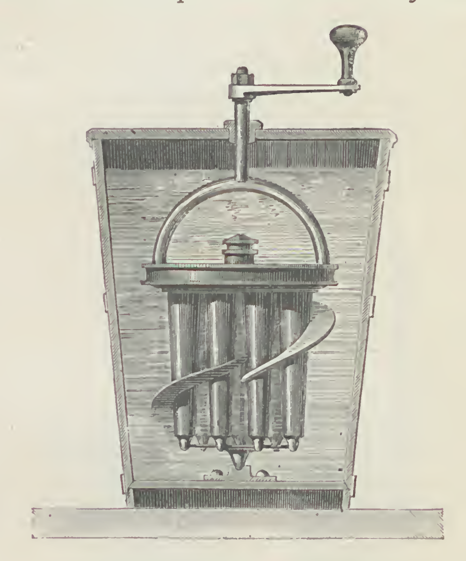


Fig. 210.—Congelador Goubaud

líquido que se ha de congelar. En el *congelador de familia*, cierto número de cajas concéntricas forman muchos compartimientos, en los cuales se introduce alternativamente el agua que se ha de congelar y la mezcla frigorífica. En el grabado, se ve el agua en A, B, B, y la mezcla en C, O. Cuando se ha congelado el agua, la

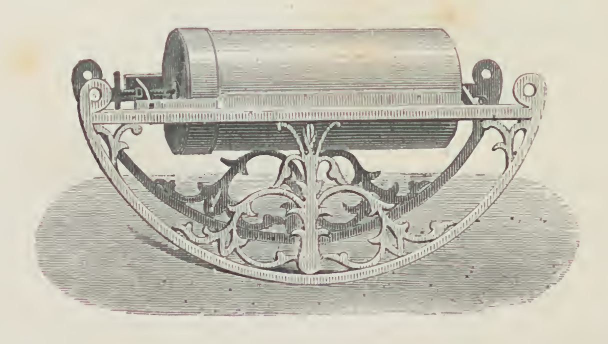


Fig. 211.—Congelador de balancin

de fusion sale por la parte inferior, rociando botellas de vino que se refrescan de este modo.

M. Toselli ha construido varios aparatos de este género, entre los cuales es de mencionar el congelador que figuraba en la Exposicion universal de 1878. Un cilindro de fondos movibles, conteniendo por una parte agua y por otra la mezcla frigorífica (nitrato de amoniaco y agua), es susceptible de recibir un movimiento de rotacion alrededor de un eje perpendicular á sus generatrices. A los pocos minutos, se obtiene un peso de hielo igual á la tercera parte del peso de nitrato empleado.

Buignet describe en los términos siguientes la *maleta-congeladora* del mismo inventor: «El manantial de frio es el nitrato de amoniaco que se disuelve en el agua, y el aparato difiere poco del *congelador de familia*. Lo verdaderamente nuevo en la *maleta-congeladora* de Toselli es la disposicion particular del receptáculo de hielo, el cual comprende cinco tubos de diámetros diferentes en los cuales se echa el agua que debe adquirir el estado sólido. Los diámetros de estos tubos están calculados de modo que cuando en la pared interna de cada cual se ha formado una capa sólida, los pedazos de hielo que se

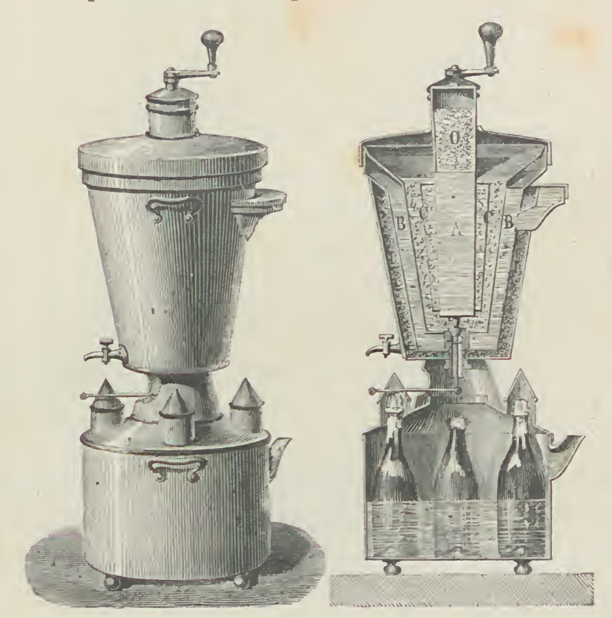


Fig. 212.—Congelador de familia

sacan forman cilindros huecos que pueden introducirse unos en otros y constituir así un trozo único y macizo, que conserva mucho tiempo su solidez. En cinco minutos se fabrica con este aparato medio kilógramo de hielo.

Como se ve por lo que precede, con las mezclas frigoríficas sólo pueden hacerse cortas cantidades de hielo. Esto será suficiente para los usos domésticos ó científicos, aparte de que la ventaja de producir una temperatura muy baja es preciosa; mas, industrialmente hablando, no pueden dar la solucion del problema de la fabricacion del hielo en grande escala, tanto más cuanto que á ello se opone el precio, bastante crecido por lo comun, de las mezclas, á causa de la dificultad con que se tropieza de regenerar sus elementos para nuevas operaciones.

II

FABRICACION INDUSTRIAL DEL HIELO

Los aparatos para la fabricacion del hielo en grande escala son hoy dia numerosos; pero los primeros que funcionaron con verdadera utilidad los inventó el ingeniero francés M. Carré, á quien se le ocurrió aprovechar las propiedades que tiene el amoniaco de disolverse con abundancia en el agua, en las condiciones normales de presion y de temperatura, y de liquidarse á su vez cuando se le fuerza á comprimirse bajo la presion de su propia atmósfera. Cuando llega á vaporizarse el gas así liquidado, la cantidad de calor que absorbe este cambio de estado es bastante grande para congelar el agua de que está rodeado el recipiente que contiene el gas.

Hé aquí la descripcion del primer aparato de esta clase ideado por M. Carré:

Consta de una caldera cilíndrica, llena en parte de una disolucion de gas amoniacal, y puesta sobre un hornillo hasta que adquiere la temperatura de 130º, lo cual se conoce merced á un termómetro cuyo tubo sale fuera de la tapadera. El gas amoniacal se desprende del agua y por un tubo abductor va al congelador ó vasija en forma de tronco de cono invertido metida en una cuba de agua fria. El interior de este congelador sirve para colocar la vasija cilíndrica que contiene el agua que se ha de congelar. Esta congelacion se logra del modo siguiente: El agua de la cuba enfria los vapores amoniacales, sometidos á una presion constante, que se desprenden sin cesar de la caldera y se condensan en la vasija cilindro-cónica; el gas se liquida y queda encerrado en unos vasitos adaptados á las paredes en el espacio anular que rodea el cilindro central, y cuyo principal objeto es multiplicar las superficies de contacto entre el líquido y el congelador. Esta primera fase de la operacion dura de tres cuartos de hora á una hora, y es la representada en la fig. 213. En este momento se retira la caldera del hornillo y se la mete en la cuba de agua fria, de donde se ha quitado el congelador, poniendo en este el cilindro lleno del agua que se ha de congelar. Hecho esto, introdúcese entre las dos superficies concéntricas alcohol que asegura su contacto, y se tapa el congelador con una cubierta de fieltro ó de lana bien seca. Entónces empieza la segunda fase de la operacion, que tambien viene á durar una hora: á causa del enfriamiento, el agua de la caldera se pone en disposicion de disolver el gas amoniaco, el cual recobra rápidamente el estado gaseoso. Esta evaporacion necesita cierta absorcion de calor, que se efectúa á expensas de la vasija central y del agua contenida en ella. Poco despues, se puede ya sacar un pedazo de hielo.

El aparato que acabamos de describir, y que está representado en la fig. 213, sirve sólo para los usos domésticos á causa de la escasa cantidad de hielo que puede producir. Lo propio sucede con el aparato ideado por E. Carré, hermano del precedente inventor, y el cual tiene por principio el frio que produce una evaporacion rápida en la superficie del ácido sulfúrico, viniendo por tanto á reproducir en grande escala el célebre experimento de Leslie.

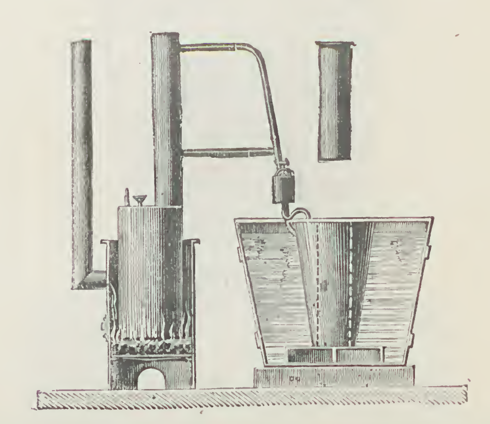


Fig. 213.—Aparato Carré para la fabricacion artificial del hielo

El ácido sulfúrico está contenido en un recipiente de plomo y antimonio, que dicho ácido no ataca á la temperatura ordinaria. De este recipiente sale un tubo acodado, á cuyo extremo se adapta la vasija que contiene el agua por congelar; por ejemplo, una botella sostenida por un tapon de cautchuc (fig. 214). Otro tubo pone en comunicacion el recipiente con el pié de una bomba neumática, que se puede manejar con la mano por medio de una palanca. Hácese á la vez el vacío sobre el ácido y en la botella, cuya agua entra entónces en ebullicion. El frio causado por la vaporizacion rápida del agua y por la absorcion de su vapor por el ácido sulfúrico basta para congelar el agua de la botella. En pocos minutos se hace así fácilmente un kilógramo de hielo.

III

FABRICACION DE HIELO.—APARATOS DE FABRICACION CONTINUA

El aparato de amoniaco de M. Carré, no sólo adolece del inconveniente de no poderse fabricar con él hielo en gran cantidad, sino que presenta otro más grave (que es la causa principal del primero), cual es el de funcionar con intermitencias. Pero el mismo inventor no tardó en resolver el problema de la continuidad, construyendo el gran aparato cuya descripcion vamos á hacer con presencia de la fig. 215.

A es la caldera donde se calienta la disolucion amoniacal; es un cilindro vertical de $1^{m},20$ de altura por $0^{m},40$ de diámetro, y aunque su capacidad es de 150 litros, sólo se la carga con 80 ó 90 de la disolucion concentrada de

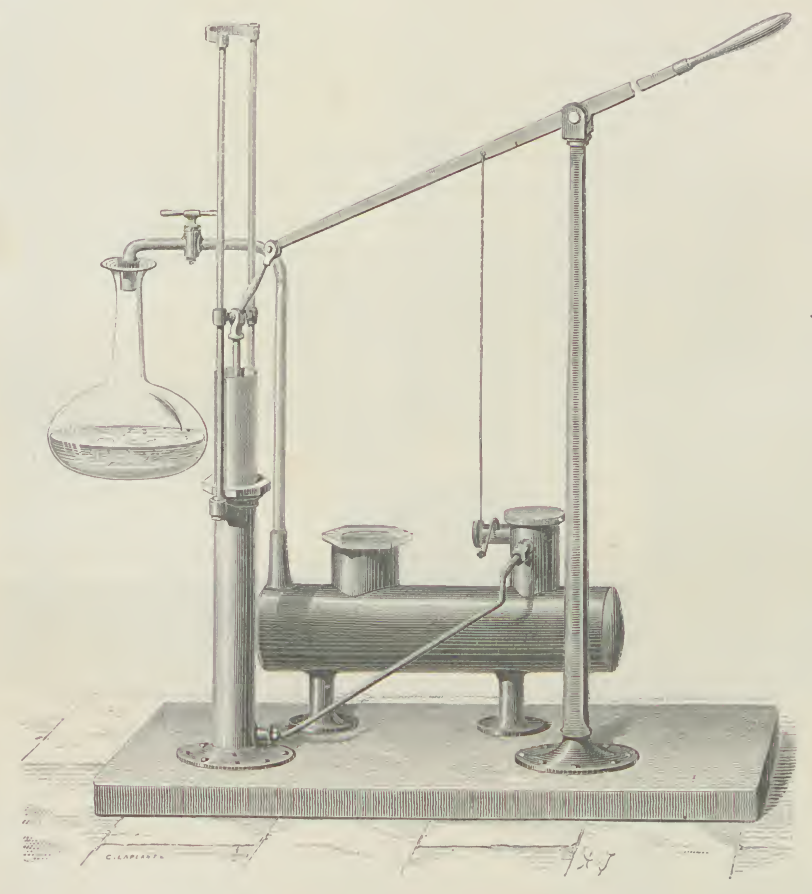


Fig. 214.—Aparato E. Carré para fabricar hielo

amoniaco. Calentada á una temperatura máximum de 130º, la tension de los vapores de agua y gas mezclados llega á ocho atmósferas. El gas que de ella se escapa pasa á un recipiente B lleno de agua fria, en el cual atraviesa una serie de cuatro serpentines planos y paralelos en los que se liquida por enfriamiento; C es un depósito del cual sale constantemente un chorro de agua fria que renueva el agua del recipiente. El gas liquidado pasa desde este á un cilindro D de 4 á 5 litros de capacidad, que hace las veces de distribuidor, gracias á un mecanismo interior que permite regular el consumo del líquido, es decir, su entrada en el depósito frigorífico G. Como hasta aquí ha conservado su presion de 8 atmósferas, es decir, un exceso de presion de 7 sobre la tension que existe en el depósito G, se interpone una llave con la cual se puede moderar el efecto de este exceso de presion. Las vasijas llenas del agua por congelar están colocadas en el *congelador* G; el líquido amoniacal, bajo la influencia del exceso de presion de 7 atmósferas, se precipita allí en el vacío relativo que se le presenta, y la evaporacion rápida que es su consecuencia produce un frio bastante intenso para congelar el agua de las vasijas allí encerradas.

La primera fase de la operacion termina, pues, por la congelacion, que es su principal objeto, y entónces empieza la segunda fase, que consiste en regenerar la solucion amoniacal de la caldera. Los vapores formados en el congelador

salen de él por un ancho tubo, y van á afluir á un receptáculo en donde cae á modo de lluvia el agua empobrecida de la parte inferior de la caldera, despues de enfriarse en un serpentin. El amoniaco se condensa en él por absorcion y reconstituye una solucion rica que cae en el fondo del receptáculo. Sólo resta hacer que pase de nuevo esta solucion á la caldera, lo cual se consigue con la bomba aspirante é impelente F que aspira el líquido enriquecido á medida que se forma, impeliéndolo luégo al recipiente, y de allí, por un tubo, á la parte superior de la caldera. Así se verifica de un modo continuo la regeneracion de la disolucion amoniacal, sin necesidad de renovar sus elementos, resultando de 15 á 18 kilógramos de hielo por kilógramo de hulla quemada. Con una máquina del tipo que acabamos de describir, se pueden fabricar en veinticuatro horas hasta 3,000 kilógramos de hielo, cuyo coste no pasa de un céntimo el kilógramo.

En la Exposicion de 1878 se exhibieron varias máquinas de fabricacion de hielo: las Sulzer, en las cuales los vapores amoniacales, en lugar

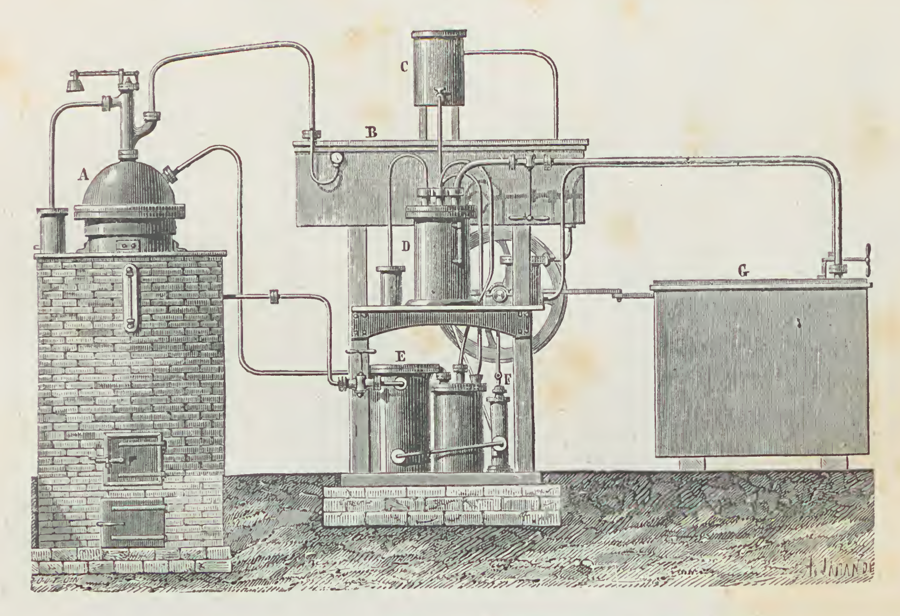


Fig. 215.—Gran aparato Carré para la fabricacion continua del hielo

de disolverse en el agua, resultaban liquidados por una bomba de compresion;—la máquina Tellier, basada en el frio que produce la evaporacion del éter metílico en el vacío, y en su liquefaccion por condensacion; una bomba de doble efecto aspirante é impelente produce estos dos efectos opuestos en las dos partes esenciales de que se compone tan ingeniosa máquina, ó sean el *frigorífero*, especie de caldera tubular que contiene éter líquido, y el *condensador*, capacidad cilíndrica que encierra un serpentin enfriado por una corriente continua de agua fria; la máquina Tellier da 200 kilógramos de hielo por hora, cuyo coste es de 2 céntimos el kilógramo;—las máquinas inglesas de la *Atlas Company*, que emplean éter en lugar de amoniaco y fabrican 1,000 kilógramos en 24 horas;—la máquina Giffard, que se vale del aire comprimido y de su expansion para producir frio y da 3,000 kilógramos diarios de hielo á 1,5 cent. el kilógramo;—y por último, la máquina de M. Raoul Pictet, fundada en la evaporacion del ácido sulfuroso líquido, y que representamos en la fig. 216. Este último aparato se compone de tres partes principales; el condensador, el congelador y el sistema de bombas aspirantes é impelentes con las cuales se hace el vacío que produce la evaporacion del ácido sulfuroso líquido, y luégo la vuelta de los vapores al estado líquido por efecto de su condensacion. Esta máquina da 1,000 kilógramos de hielo por hora. Un motor horizontal de la fuerza de 50 caballos hace funcionar las bombas: para fabricar 22 kilógramos de hielo se gasta un kilógramo de hulla, lo que, considerados todos los demás gastos, hace que salga á medio céntimo el coste de cada kilógramo.

Para terminar la enumeracion de estos aparatos de produccion industrial del frio, mencionemos tambien, por más que sirva con prefe-

rencia para las investigaciones científicas, el *frigorífero* Vincent, cuyo modo de funcionar comprenderemos examinando la fig. 217. Vincent ha procurado utilizar las propiedades del cloruro de metilo, que entra en ebullicion á la baja temperatura de 23 grados bajo cero. Hé aquí, segun Schutzenberger, la descripcion y uso del aparato en cuestion:

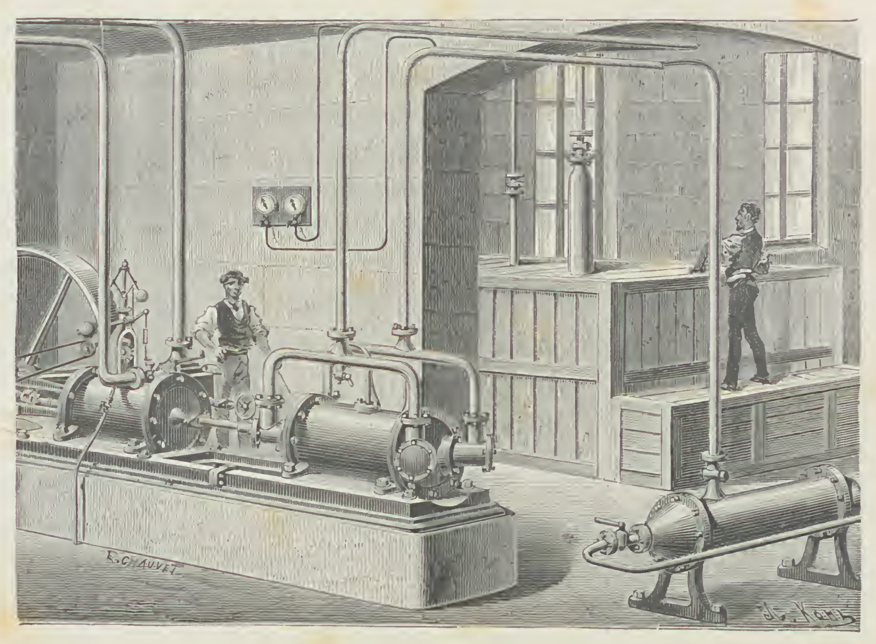


Fig. 216.—Máquina de Raoul Pictet para fabricar hielo

«El frigorífero Vincent se compone de una vasija cilíndrica de cobre AM, de dobles paredes, entre cuyos intervalos AA se puede introducir cloruro de metilo por una llave BC, formada de un vástago de acero terminado en un cono que se adapta á una hembra de bronce y que se puede manejar fácilmente con el mango D. Un tornillo metálico S, aplicado sobre una rodaja de plomo, cierra un segundo orificio que pone el espacio anular en comunicacion con el aire ambiente; en el momento de llenar el aparato, se afloja un tanto este tornillo para dejar escapar el aire.

»La provision de cloruro de metilo está en un cilindro de cobre P que sirve para su trasporte y que tiene una llave de tornillo *b* semejante á la del frigorífero, haciéndose pasar fácilmente el líquido á este último aparato por un tubo de goma reforzado con una cubierta de lienzo. De este modo se pueden introducir unos dos kilógramos y medio de cloruro de metilo en el frigorífero.

En la vasija central se echa un líquido incongelable, como el alcohol, para formar un baño en el cual pueden meterse los cuerpos que se han de enfriar, y especialmente el tubo K, al través del cual se hacen circular los gases destinados á la liquefaccion. El cilindro está rodeado de una materia poco conductora del calor, como las raspaduras de corcho, sostenida por una envolvente E.

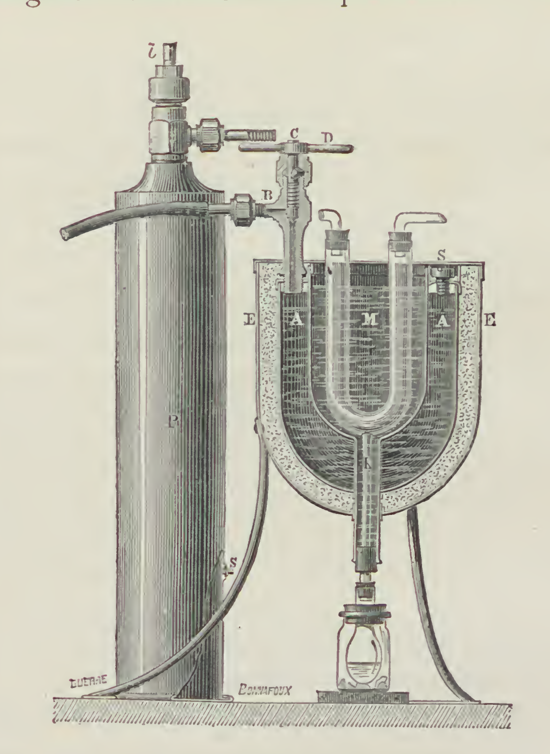


Fig. 217.—Frigorífero C. Vincent

»Para bajar la temperatura del baño á —27° basta abrir la llave; si por el contrario se la quiere hacer llegar á —50°, se enlaza la llave del frigorífero con una buena máquina neumática. Un aparato doble, compuesto de dos frigoríferos y una bomba aspirante é impelente movida por un volante, permite evitar la pérdida del cloruro, y condensarlo de nuevo despues de su evaporacion.»

Con el frigorífero sencillo se puede hacer un gran número de experimentos de laboratorio, por ejemplo la liquefaccion de gases ó la congelacion de líquidos, experimentos que requerian ántes el uso costoso del protóxido de ázoe líquido ó del ácido carbónico sólido. El aparato de bomba aspirante é impelente con el cual se puede hacer sucesivamente el vacío en el frigorífero para obtener una temperatura más baja, y recuperar en seguida el cloruro en estado líquido por la condensacion, puede servir para los usos domésticos lo mismo que para los del laboratorio, obteniéndose con él hielo rápidamente.

M. Vincent ha hecho construir tambien grandes máquinas frigoríficas, merced á las cuales las aplicaciones industriales recibirán sin duda importante desarrollo.

Una de estas máquinas se compone de tres partes principales: el *frigorífero*, donde se hace la vaporizacion del cloruro de metilo líquido y donde, como su nombre lo indica, se produce el frio; el *liquefactor*, aparato en que el vapor comprimido vuelve á pasar al estado líquido, y la *bomba aspirante é impelente*, cuya accion tiene el doble objeto de recoger el vapor al salir del frigorífero y de impelerlo comprimido al liquefactor. En marcha normal, la presion en esta parte de la máquina varía entre 3 y 4 atmósferas, segun la temperatura del agua empleada en la refrigeracion. El grado de vacío en el frigorífero oscila entre 0 y 0,5 atmósfera, segun el grado de frio que se quiera obtener. Una de estas grandes máquinas puede producir de 100 á 500 kilógramos de hielo por hora.

El uso del cloruro de metilo tiene otras ventajas aparte de su gran potencia frigorífica; este líquido no altera los metales; los obreros pueden respirar sin inconveniente sus vapores, de olor suave, y por último, es un producto de fabricacion corriente.

IV

VARIAS APLICACIONES DE LAS MÁQUINAS DE FABRICACION DE HIELO Y APARATOS FRIGORÍFICOS

Despues de haber descrito con los detalles necesarios los procedimientos empleados para producir bajas temperaturas y los aparatos que sirven para la fabricacion del hielo, creo que no estará de más que indiquemos varias de las aplicaciones más importantes que los inventores tuvieron en mientes al discurrir máquinas ó sistemas.

La mayoría de las sustancias orgánicas, animales ó vegetales, sufren muy pronto, cuando dejan de formar parte de un sér viviente, y á las temperaturas ordinarias y al contacto del aire, una fermentacion que no tarda en presentar los caractéres de una descomposicion pútrida, tanto más rápida cuanto más elevada la temperatura. Si el frio es suficientemente intenso, la fermentacion no es ya posible; no pasa adelante; llenando esta condicion la temperatura á 0°.

Naturalmente debia tratarse de aprovechar los frios artificiales, apelar por ejemplo al hielo, para conservar sustancias alimenticias, huevos carne, caza, pescado, etc., á cuyo fin se ha empezado por construir pequeños congeladores domésticos muy apropiados y bastante económicos. Haremos mencion de los que habia adoptado M. Pasteur en el laboratorio de la Escuela normal para prolongar el sueño de ciertas simientes de gusanos de seda, para conservar fermentos, etc. Consistia simplemente en una fuentecilla de arenisca puesta en el centro de un tonel y rodeada de un cuerpo mal conductor, como el algodon en rama. En medio de la fuente, y separada de ella con pedazos de hielo, habia una caja de hojalata llena de agujeros, la cual contenia los objetos que se habian de enfriar. Bastaba un kilógramo de hielo para mantener una temperatura de 0° por espacio de tres ó cuatro dias; el agua de fusion salia por el grifo de la fuente.

Instalando en un sótano este sencillo congelador, cualquiera puede conservar en su casa, á poco coste, toda clase de objetos alimenticios que se echarian fácilmente á perder durante los calores del verano.

M. C. Tellier ha ideado con el propio objeto

varios aparatos, á los cuales da una forma cualquiera, por ejemplo, la de un aparador de comedor; para la conservacion de la carne en las carnicerías construia una especie de cisterna abierta en el suelo. En un tronco de cilindro de dobles paredes ponia las carnes suspendidas de una especie de vasar ó de jaula metálica, que se subia y bajaba con una polea. El intervalo que mediaba entre las dobles paredes del cilindro estaba lleno de hielo, y el cilindro protegido á su vez por capas de materias aisladoras amontonadas entre aquel y las paredes de la cisterna. Se podia dar salida al agua de fusion con una pequeña bomba de mano, que la sacaba lateralmente del fondo de la cisterna.

Supongamos estos sistemas generalizados y aplicados en grande escala á todo un buque, y tendremos la disposicion adoptada por el mismo inventor para el trasporte de carnes de América á Europa. Con este objeto se habia acondicionado el *Frigorífico*, buque de 900 toneladas, que hizo un viaje al Rio de la Plata en 1876 y volvió á Francia en el mes de julio de 1877 cargado de carne en buen estado de conservacion. El medio empleado para mantenerla así toda la travesía consistia en hacer que pasara constantemente por los almacenes en que estaba colgada una corriente de aire seco y frio. Los aparatos productores del frio eran los mismos de que ya hemos tratado en el artículo anterior, basados en la vaporizacion del éter metílico. Colocadas estas máquinas á popa, enfriaban el aire recogido del exterior en un espacio llamado *cámara de frio*, cuyas paredes se cubrian de toda la humedad contenida en dicho aire, en forma de escarcha depositada en su superficie. El aire, enfriado de este modo á unos 2° bajo cero, pasaba por debajo del pavimento de los almacenes ó *cámaras de carne*, preservados del calor exterior por un doble forro de hierro y tablas y una capa de materias (paja cortada y fieltro) interpuesta entre ellas. Una máquina de vapor hacia funcionar las bombas que producian la ventilacion constante de las cámaras y la renovacion del aire á baja temperatura que necesitaban (1).

En las cercanías de Nueva York hay un establecimiento en el cual se conserva el pescado por el frio. Todo el primer piso del edificio lo ocupa una sala de enfriamiento dividida por tabiques en muchos compartimientos. Sus paredes son dobles así como los techos que la separan del piso segundo, estando los intervalos llenos de una mezcla de hielo machacado y sal. En estas habitaciones frias se cuelgan los peces, despues de haberlos enfriado y congelado en vasijas de barro, entre capas de hielo y sal marina, poniéndose entónces tan duros, tan rígidos como masas de hielo ó barras de metal. «Se los conserva en tal estado, dice un artículo de *La Naturaleza* del cual tomamos estos detalles, por espacio de un mes y hasta de un año, y al cabo de este tiempo están tan frescos como si los acabasen de pescar, bastando deshelarlos para poderlos cocer fácilmente. Se cogen los peces en verano, cuando la pesca es más abundante, y se los conserva comunmente hasta el invierno.» Recientemente se han hecho en Roma y en Argel instalaciones análogas.

Tambien se conservan las frutas frescas por sistemas parecidos. Así es que los horticultores de las cercanías de San Francisco, no hallando salida á sus frutos, han hecho construir wagones provistos de aparatos frigoríficos, capaces de mantener más de un mes en estado fresco los frutos que expiden por la gran vía férrea del Pacífico á las ciudades de los Estados del Este. De este modo pueden recibir Nueva York, Boston y Filadelfia, en un plazo de diez dias, los frutos cosechados en California.

En San Petersburgo, se hielan los huevos para conservarlos; en Nueva York, el pescado; en San Francisco es probable que no se hielen los frutos, sino que se contenten con una temperatura bastante fresca para impedir la fermentacion.

Pasemos á ocuparnos de otras aplicaciones

(1) Hé aquí, segun el médico de marina M. Delpeuch, lo que sucede á la carne sometida á estas condiciones: «Se endurece y se seca superficialmente, tomando la consistencia de aponeurosis, ó por mejor decir, de asta, y bajo esta costra de tres milímetros de espesor, se encuentra la carne encarnada y jugosa, tal cual la vemos á las pocas horas de salir del matadero; y en cuanto á tenacidad de la fibra y á solidez y elasticidad de la masa, no se diferencia de la carne fresca. Por último, no despide ningun olor; no siendo esto todo; sino que la carne en cuestion, muerta hace muchos meses, no experimenta, al sacarla del medio artificial en que se la ha conservado, la rápida descomposicion que sufre, por ejemplo, la que ha permanecido entre hielo; despojada de la costra protectora que la ha hecho adquirir el aire frio, torna á las condiciones normales de carne fresca, y no se echa á perder sino cuando ha trascurrido el tiempo fijado á esta por el clima y la estacion.» A pesar de todas las condiciones aparentes de buen éxito que hacia presagiar este ensayo, la empresa del *Frigorífico* no ha seguido adelante por causas que ignoramos.

industriales del frio, más importantes que las anteriores.

M. Raoul Pictet ha utilizado las máquinas de fabricacion de hielo para rectificar los alcoholes. Esta operacion que, como es sabido, tiene por objeto trasformar los alcoholes de *mal gusto* en alcoholes *finos*, es decir, exentos de los éteres y aceites empireumáticos que los hacen impropios para el consumo, está reducida á estrechos límites en los procedimientos ordinarios, á causa de las temperaturas relativamente elevadas á que se hace la separacion de los vapores de los líquidos de varias clases que componen las flemas. Siendo considerable la tension de cada uno de estos vapores á dichas temperaturas, todos ellos pasan en mayores ó menores proporciones en el trabajo de rectificacion.

Basándose M. Pictet en el principio de que «la proporcion de alcohol que se evapora de una mezcla es máximun en las bajas temperaturas,» se ha propuesto establecer un sistema que realice las condiciones siguientes: 1.º hacer variable á beneplácito la temperatura del líquido hirviente; 2.º hacer variable la presion de los vapores que actúan sobre el líquido. «Así pues, dice, para efectuar la rectificacion del alcohol basta suscitar su ebullicion á bajas temperaturas y mantener esta ebullicion sin cambiar estas temperaturas una vez obtenidas.» No nos entretendremos en describir los aparatos y las operaciones en virtud de las cuales M. Pictet ha sabido realizar estas condiciones. Bástenos decir que los órganos que sirven para mantener las bajas temperaturas en cuestion son frigoríficos que contienen anhidrido sulfuroso líquido, y en los que, por la accion de una bomba especial, la evaporacion de este ácido ocasiona un descenso de temperatura que varía entre 25º y 50º bajo cero. Por lo demás, son unos frigoríficos en un todo semejantes á los de las máquinas de fabricacion de hielo del mismo inventor.

Otra aplicacion industrial de las máquinas frigoríficas es la que tiene por objeto el enfriamiento del mosto de la cerveza despues de cocido. Cuando esta coccion ha terminado, el mosto pasa desde la caldera por unos tubos de cobre á grandes depósitos poco profundos, llamados *enfriadores* é instalados en graneros perfectamente aireados. Esta operacion, merced á la cual se depositan las diferentes sustancias en disolucion ó en suspension en el mosto, puede activarse empleando varios de los frigoríficos cuya descripcion hemos dado. Utilízanse asimismo para hacer *cerveza de conserva*, la cual se obtenia ántes dirigiendo el producto de la primera fermentacion á grandes cubas situadas en cuevas rodeadas de hielo ó *neveras*. Hace algunos años que se ha abierto en el Cairo una cervecería en la que se usan las máquinas Raoul Pictet para hacer el hielo necesario á fin de mantener á baja temperatura las cuevas en que se fabrica la cerveza.

Entre las aplicaciones de las máquinas frigoríficas que, segun creemos, no se han llevado aún á cabo, pero que nos parece se llevarán de un momento á otro, figura la ventilacion en verano de los grandes salones de reunion, de los teatros, y sobre todo de los hospitales. Este problema de higiene, de tan difícil solucion, puesto que hasta ahora apénas se ha conseguido otra cosa que sustituir el aire viciado del interior con el aire puro, mas siempre caliente, del exterior, tendria así una solucion. Bastaria hacer pasar préviamente el aire exterior por *cámaras de frio* en las que unas máquinas de hielo mantuviesen constantemente una baja temperatura. ¿Costaria mucho esta sustitucion? Quizá esté aquí el nudo ó la dificultad de la solucion del problema.

CAPITULO VII

LA MÁQUINA DE VAPOR

I

EL VAPOR COMO FUERZA MOTRIZ

De todas las aplicaciones del vapor, y áun podemos añadir, de todas cuantas los demás agentes físicos han permitido realizar, no hay ninguna cuya importancia pueda compararse con la del vapor usado como fuerza motriz. Apénas han trascurrido dos siglos desde que se hicieron los primeros ensayos que dieron por resultado la máquina de vapor; aún no hace cien años que empezó esta á tomar posesion de los talleres, y ya ha producido una revolucion en la industria del mundo entero. Despues de invadir las fábricas, la navegacion y las vías férreas, se difunde por las granjas y auxilia los trabajos agrícolas. Las consecuencias económicas ó sociales de la sustitucion de las fuerzas del hombre ó de los animales por este poderoso motor se desarrollan á nuestra vista con rapidez prodigiosa. No creemos por lo tanto que nuestros lectores lleven á mal el que consagremos varios capítulos al estudio de la máquina de vapor bajo sus variadas formas.

Los antiguos conocian la fuerza elástica del vapor de agua. Sin tener nociones claras, precisas, de sus propiedades físicas — ya se ha visto que los inventores modernos no estaban mucho más adelantados al principio,—habian procurado sacar partido de esta fuerza.

Con tal objeto, Heron de Alejandría inventó la máquina á la que se ha dado el nombre de *eolípila* y otros aparatos en los que entraba en juego la accion del aire comprimido ó dilatado. Vamos á ver, en efecto, que el movimiento de la eolipila tenia por causa la fuerza expansiva del vapor, pero obrando de un modo muy distinto de cómo obra en las modernas máquinas de vapor.

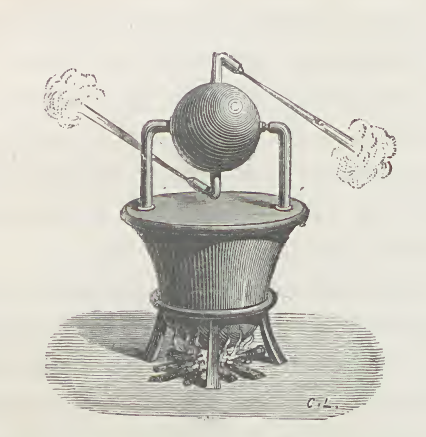
Consistia en una marmita ó caldera llena en parte de agua, puesta sobre un hornillo y cerrada con una tapadera. En esta habia un tubo hueco y doblado, provisto de una llave, el cual sostenia, penetrando en ella, una esfera metálica hueca que estaba sostenida exteriormente por otro montante igual en el extremo del mismo diámetro. La esfera era, pues, movible alrededor de este diámetro ó eje.

Otros dos tubos huecos y doblados partian de la superficie de la esfera, en los extremos de un diámetro perpendicular al eje. Esto sentado, vamos ahora á comprender la accion motriz del vapor en este pequeño aparato. Se abre la llave, el vapor pasa de la caldera al tubo hueco y llena la esfera metálica: si esta no tuviese ninguna abertura, permaneceria inmóvil, pero el vapor que tiende á ejercer su presion en la superficie interior de la esfera con la misma fuerza en todos los puntos, encontrando dos salidas, se escapa por ellas con ruido condensándose en el aire; la reaccion, que le hubiera equilibrado en el caso de estar completamente cerrada la esfera, se ejerce, pues, en sentido contrario, y esta gira con mayor ó menor rapidez en direccion opuesta á la de la salida del vapor.

La *eolípila* (nombre que significa *puerta de Eda* ó *puerta del aire*) es, como se ve, una máquina en que la fuerza elástica del vapor obra por reaccion. Por lo demás, nunca ha sido otra cosa sino un objeto de física recreativa, áun cuando llamó la atencion de los sabios y de los experimentadores de los siglos que precedieron al de Papin, y por más que se le haya descrito proponiendo utilizarlo para hacer dar vueltas á los asadores.

El aparato descrito por Salomon de Caus en su opúsculo titulado: *Las razones de las fuerzas motoras* (1615) es un ejemplo de una aplicacion más directa de la fuerza expansiva del vapor. Por la llave D (fig. 219) se introduce agua en la esfera hueca A que se pone al fuego despues de cerrar la llave de introduccion. Un tubo BC pasa por otra abertura B y llega al

agua, pero sin tocar al fondo. Cuando se ha formado suficiente cantidad de vapor y su tension es bastante fuerte, se abre la llave B y el agua, comprimida en su superficie interior por la fuerza elástica del vapor, salta fuera por el tubo.


Fig. 218.—Eolipila de Heron de Alejandría

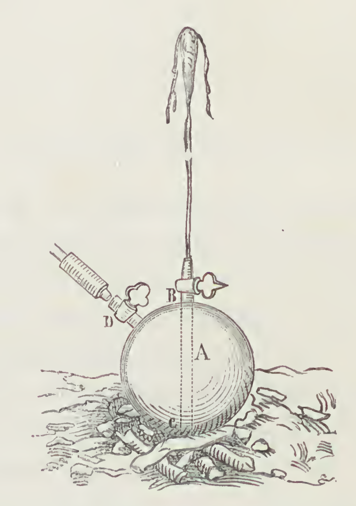


Fig. 219.—Aparato de Salomon de Caus

El relato completo y detallado de todas estas tentativas, de estos esbozos mecánicos con los que se buscaba el modo de utilizar diferentes fuerzas naturales, las del aire dilatado ó comprimido y la del vapor, tiene un innegable interés para la historia del progreso de las aplicaciones de la ciencia humana. Pero todo esto no ha sido séria y verdaderamente instructivo hasta la época en que saliendo la física de la fase de las explicaciones sutiles é infecundas, ha entrado en la vía de la práctica, merced á los Galileo, á los Boyle, á los Huyghens.

La máquina de vapor no podia nacer y sobre todo no podia recibir los perfeccionamientos que han hecho de ella un verdadero motor industrial, sino en el siglo en que se han descubierto las propiedades del aire, la máquina neumática, el barómetro y el termómetro; Papin y Watt son los hijos de Torricelli y de Galileo. La máquina de vapor es hija de dos inventos tan sencillos como fecundos; el del *barómetro*, que demuestra y mide la presion de la atmósfera, y compara con ella las fuerzas elásticas de los gases y vapores; y el del *termómetro*, que mide los grados de calor. Tambien acababa de darse con el modo de hacer el vacío, ya en la cámara barométrica ó ya en un recipiente del que se extrae el aire con una bomba, preciosa invencion de Otto de Guericke, cuando el ilustre Dionisio Papin echó las bases de la mayor revolucion industrial que ha visto el mundo.

Mas, para precisar mejor la serie de ideas que han debido concebir los grandes talentos que tuvieron la gloria de unir sus nombres al descubrimiento de la máquina de vapor, es indispensable entrar en algunos detalles.

II

PAPIN; PRIMERAS PRUEBAS; SAVERY.—ÓRGANOS ESENCIALES DE LA MÁQUINA DE VAPOR MODERNA.

Ya en 1680 habia pensado Huyghens en utilizar la fuerza expansiva de la pólvora, y hé aquí cómo; en un cilindro provisto de un émbolo hacia estallar cierta cantidad de pólvora, y la expansion de los gases expulsaba el aire contenido en el cilindro por dos aberturas arregladas de modo que podian cerrarse en seguida. Hacíase, pues, el vacío, á lo ménos parcialmente, de suerte que la presion de la atmósfera se ejercia sobre la cara superior del émbolo con una energía proporcional á su superficie y en relacion con el grado de vacío obtenido.

Fig. 220. — Primera máquina de vapor de Papin

Un modesto médico francés, Dionisio Papin, á quien la revocacion del edicto de Nantes obligó á expatriarse, empezó por idear (1)

(1) Esta primera tentativa data del año 1688.

el modo de perfeccionar la máquina propuesta por Huyghens, máquina que, en concepto de su autor, no tan sólo podia servir para elevar toda clase de grandes pesos y aguas para las fuentes, sino tambien para disparar balas y flechas con mucha fuerza, al modo de las balistas de los antiguos.» Pero dos años despues, ó sea en 1690, pensó en sustituir á la pólvora otro agente á propósito como ella para hacer el vacío debajo del émbolo, y dejando á la presion atmosférica toda su preponderancia.

Este agente era el vapor de agua, con el cual ya estaba familiarizado Dionisio Papin, puesto que en 1681 habia inventado su famosa marmita, el *Nuevo digestor* del que nos ocuparemos más adelante. Hé aquí, en pocas líneas la descripcion de la primera máquina de vapor tal como Papin la habia ideado y la explicacion de sus efectos, facilísima de comprender.

B es un émbolo provisto de un vástago vertical D, y móvil en un cilindro del mismo diámetro, en cuyo interior se ha echado una corta cantidad de agua. En el émbolo se ha abierto un agujero L, que se puede cerrar cuando se quiera por medio de la espiga M.

Supongamos ahora que el émbolo está tan metido en el cilindro, que llega á tocar la superficie del agua, una parte de la cual ha podido salir por el agujero que á la sazon está cerrado por medio de la espiga. Coloquemos en seguida el cilindro, cuyas paredes son metálicas, en un hornillo encendido; el agua se convierte al poco rato en vapor, y venciendo este á causa de su fuerza elástica el peso del émbolo y la presion atmosférica, hace que aquel suba hasta lo alto del cilindro. Tan luégo como el émbolo llega al punto culminante de su carrera, una espiga C, movible alrededor de uno de sus puntos y mantenida hasta entónces en contacto con el vástago del émbolo por medio de un muelle G, penetra en una hendidura de dicho vástago, cuando el movimiento ascendente la pone en frente de la espiga, y por consiguiente, detiene al émbolo en su subida.

Quitemos ahora el hornillo de debajo del cilindro; al poco rato se enfrian las paredes de este y el vapor de agua que contenian; el vapor se condensa y queda el vacío debajo del émbolo, de suerte que si se hace salir la espiga de la hendidura en la que mantiene sujetos el vástago y el émbolo, el peso de la atmósfera que gravita sobre este le empujará de arriba abajo, y se podrá aprovechar esta presion considerable para hacerle levantar grandes pesos.

En una palabra, la disposicion de la máquina de Papin difiere un poco de aquella en que Huyghens hacia el vacío por medio de la pólvora, pero el efecto producido es el mismo.

La principal diferencia consiste en que en aquella es el vapor de agua el que actúa; su fuerza elástica la que hace subir el émbolo, y su condensacion por el frio la que hace el vacío.

Tomemos aquí nota de dos hechos. Papin, en su primera máquina de vapor, emplea desde luégo el flúido elástico á una presion algo superior á la atmosférica; entónces le sirve para levantar el émbolo; luégo lo condensa por enfriamiento hasta producir el vacío, resultando que la presion de la atmósfera es el verdadero motor, la que efectúa el trabajo útil en vista del cual se ha construido la máquina.

Más adelante modificó su primera idea, aunque á la verdad con poca fortuna; la máquina que acabamos de definir es la que en realidad constituye su principal título de gloria, su derecho incontestable á que se le considere como inventor de la máquina de vapor.

Vino despues Savery (1698), y tuvo la feliz idea de producir el vapor en un recipiente separado, condensándolo en otro, pero su máquina, de la que trataremos más adelante, es por otro concepto una retrogradacion respecto de la de Papin, porque en ella se emplea la fuerza elástica del vapor para rechazar el agua directamente, al paso que la de Papin se sirve de esta fuerza, segun acabamos de ver, para poner en movimiento un émbolo, movimiento que bastará trasformar por medios puramente mecánicos para hacer de la máquina de vapor un motor universal.

Pero ántes de continuar esta reseña histórica, que completaremos más adelante describiendo la máquina de Savery, veamos someramente cuál es el principio de la máquina de vapor moderna, y de qué órganos esenciales se compone.—Ante todo, hay que pensar en desarrollar la fuerza, es decir, en producir y recoger cierta cantidad de vapor de agua. Esto se consigue calentando á la lumbre de un hornillo una marmita ó caldera llena de agua, en parte

al ménos. Tal es el *generador de vapor*, una de las tres partes esenciales ó constitutivas de toda máquina.

El vapor pasa desde la caldera á una capacidad ó depósito de forma cilíndrica, dividido en dos por un émbolo movible; allí es donde, en virtud de ciertas disposiciones cuya descripcion haremos muy luégo, ejerce su accion el vapor, ora á un lado, ya á otro del émbolo, de modo que le imprime un movimiento alternativo ó de vaiven, movimiento que es el objeto de la máquina.

El cilindro, el émbolo y las piezas accesorias que distribuyen el vapor por las dos cámaras ó divisiones del cilindro constituyen la parte de la máquina que forma el *mecanismo motor;* es la máquina cuyo juego no podria comprenderse bien si no diésemos algunos detalles más.

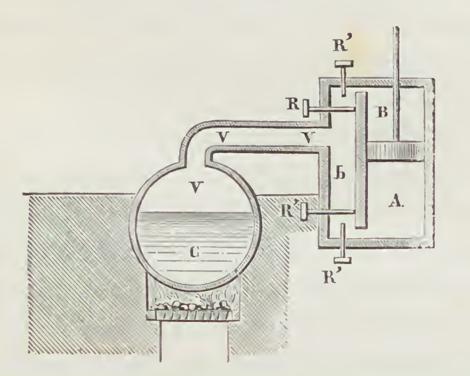


Fig. 221.—Organos esenciales de la máquina de vapor

Consideremos el grabado 221 que representa la máquina de vapor reducida á sus órganos esenciales.

Dicho grabado figura el generador en el que el agua se trasforma en vapor que llena el espacio situado encima del agua de la caldera así como el tubo VV. Por este tubo pasa el gas elástico á una capacidad B contigua al cilindro, y que se llama caja de vapor.

Merced á dos llaves R'R' puede llegar el vapor, cuando una ú otra está abierta, ya á la cámara superior B ó ya á la cámara inferior A del cilindro. Supongamos por de pronto que la llave superior está abierta y la otra cerrada. El vapor pasa á B, empuja el émbolo y tiende á imprimirle un movimiento descendente en el cilindro. Si en este momento se cierra la llave superior y se abre la otra, el vapor pasará á A, y empujando al émbolo por su cara inferior propenderá á hacerlo subir.

Pero aquí se presenta una dificultad: si el vapor se encontrara á la vez en A y en B, como su fuerza elástica es igual en ambos lados, su accion sobre la cara inferior del émbolo contrabalancearia la ejercida sobre la cara superior y por consiguiente no habria movimiento.

Era menester, pues, hallar el medio de anular su fuerza elástica una vez ejercida su accion, y esto alternativamente en las dos cámaras del cilindro. Esto se consigue abriendo sucesivamente las llaves R' y R', cada una de las cuales está adaptada á un orificio por el que se pone el vapor en comunicacion con un espacio vacío de aire, que contiene agua fria, y cuyas paredes están á una temperatura baja. Este espacio no está figurado en nuestro dibujo. Tan luégo como el flúido penetra en dicho espacio, que se llama el *condensador*, se precipita en estado líquido casi por completo, y lo que de él queda no tiene sino una densidad insignificante, muy inferior á la tension que tiene el vapor, ya sea en la caldera, ó ya en el cilindro. Esta disposicion es necesaria en las máquinas en que el vapor no obra sino con una tension poco mayor que la presion atmósferica. Cuando aquel tiene una tension igual á muchas atmósferas, no se necesita condensador, por cuanto la condensacion se verifica al aire libre.

Es fácil ya comprender que, en cada uno de estos casos, la dificultad indicada queda vencida, pues supongamos que la llave superior R está abierta y la inferior cerrada, miéntras que la llave superior R' está cerrada y la inferior abierta. El vapor afluye á B, en donde ejerce su accion; el que habia en A se condensa, y se hace el vacío debajo del émbolo que desciende hasta el fondo del cilindro. En este momento, inviértese el juego de las llaves. El vapor de la caldera penetra en A; el de B se condensa y el émbolo es empujado de abajo arriba, y así sucesiva é indefinidamente.

Tal es, en su principio y en sus disposiciones fundamentales, la máquina de vapor moderna. Un movimiento rectilíneo alternativo, determinada por la accion de la fuerza elástica del vapor en un cilindro cerrado por todas partes, accion que cesa bruscamente tan luégo como el mismo vapor se condensa por enfriamiento. Una vez obtenido el movimiento, sólo resta hacerle producir un efecto útil, trasformándolo de mil maneras, segun las necesidades de la

industria, y exigiéndole por ejemplo unas veces pujanza, otras rapidez, y otras rapidez y pujanza reunidas. El mecanismo que efectúa esta trasformacion es el tercer elemento que habremos de estudiar para completar la descripcion de la máquina de vapor, de suerte que se puede resumir del modo siguiente todo el objeto de la parte técnica de este capítulo:

El *generador* ó la *caldera;*

El *receptor* ó *mecanismo motor* y el *mecanismo de distribucion;*

El *mecanismo de trasmision;*

Estudiemos en detalle cada una de estas partes de la máquina.

III

LA CALDERA Ó EL GENERADOR

Las formas de caldera adoptadas hoy son tantas que ni siquiera intentaremos enumerarlas; para el objeto que nos proponemos bastará

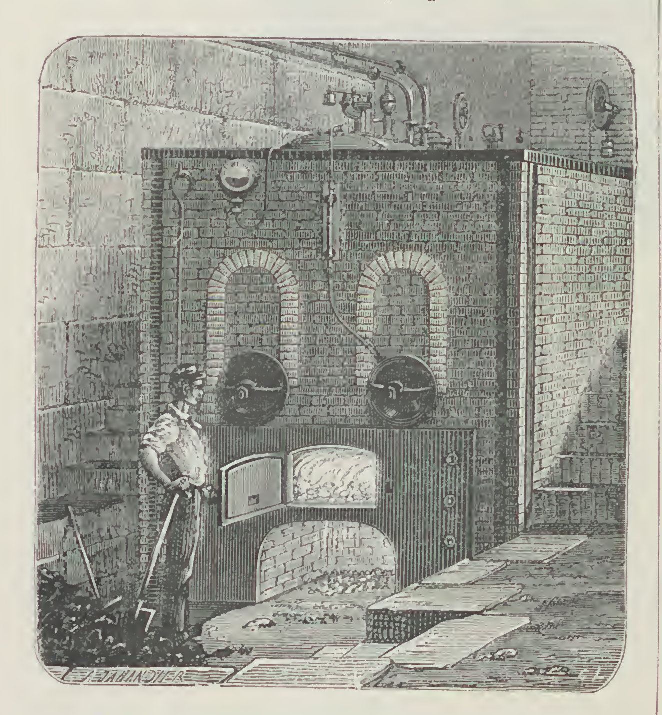


Fig. 222.—Caldera de dos hervidores: vista exterior

hacer comprender en qué se parecen y en qué difieren sus principales sistemas. Mas ántes de llegar á esto, menester será que conozcamos de un modo preciso un ejemplar de alguno de ellos. Consideremos pues la caldera más generalmente adoptada en las grandes fábricas en que se usan máquinas fijas, es decir, construidas, instaladas de un modo estable en el sitio mismo en que funcionan. La figura 222 representa su aspecto exterior. Veamos cuáles son sus disposiciones interiores.

En la parte superior de la obra de mampostería descansa un gran recipiente de hierro

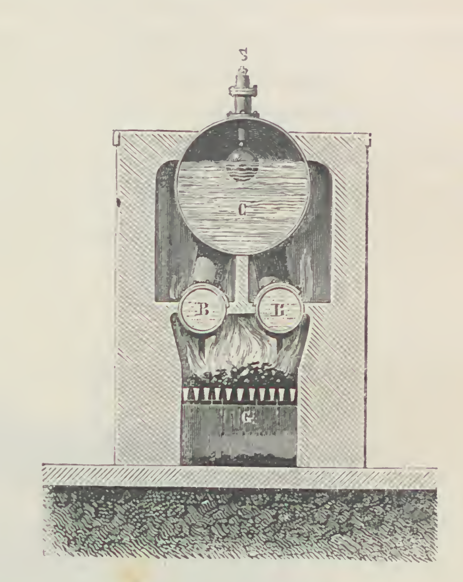


Fig. 223.—Seccion trasversal de una caldera de dos hervidores

fundido, de forma cilíndrica en toda su longitud, y terminado en los dos extremos en dos casquetes ó fondos hemisféricos. Es el cuerpo de la caldera más voluminosa, la que contiene la mayor masa de agua para vaporizar. Las figuras 223 y 224 la presentan en CC, figurando sus dos secciones, longitudinal y trasversal. Debajo del cuerpo principal se ven dos y á veces tres largos tubos tambien cilíndricos B B, que comunican con él por ciertos conductos llamados *toberas.*

Dichos tubos son los *hervidores,* enteramente llenos de agua y situados directamente encima del hogar cuyas llamas lamen su superficie exterior, siendo en su seno á no dudarlo dónde empieza desde luego la ebullicion ó donde se forman las primeras burbujas de vapor, justificando así su nombre de hervidores.

Los dos grabados siguientes indican con bastante claridad la posicion y dimensiones del hogar, de la parrilla y del cenicero, para que nos eximan de la necesidad de detenernos más en su descripcion.

Por lo que hace á la chimenea, vésela en su base pudiendo seguirse la marcha del humo y de los gases de la combustion desde su orígen por encima del hogar hasta dicha base, á través de los conductos de humo ó humerales, *cc,* que están situados entre los hervidores, el cuerpo

principal de la caldera y la obra de mampostería que los rodea.

Conviene fijarse en la colocacion de estos humerales; el que está debajo de los hervidores obliga á la llama y á los gases calientes á marchar hasta el fondo de la hornilla y á calentar directamente y ante todo los mismos hervidores. Al llegar allí, los gases suben á uno de los dos conductos de humo laterales superiores, cediendo todavía parte del calor que han conservado á la pared de la caldera con la cual se ponen en contacto. Finalmente, hacen una tercera marcha y pasan al otro conducto de humo lateral para escaparse en seguida por la chimenea.

Fácil es comprender el objeto á que todo se encamina. Trátase de utilizar en lo posible el calor que emana del hogar, ya sea por el contacto y por la accion directa de la llama, ó bien por la de los gases de la combustion, los cuales, aun cuando no estén ya incandescentes, no por ello dejan de conservar una enorme

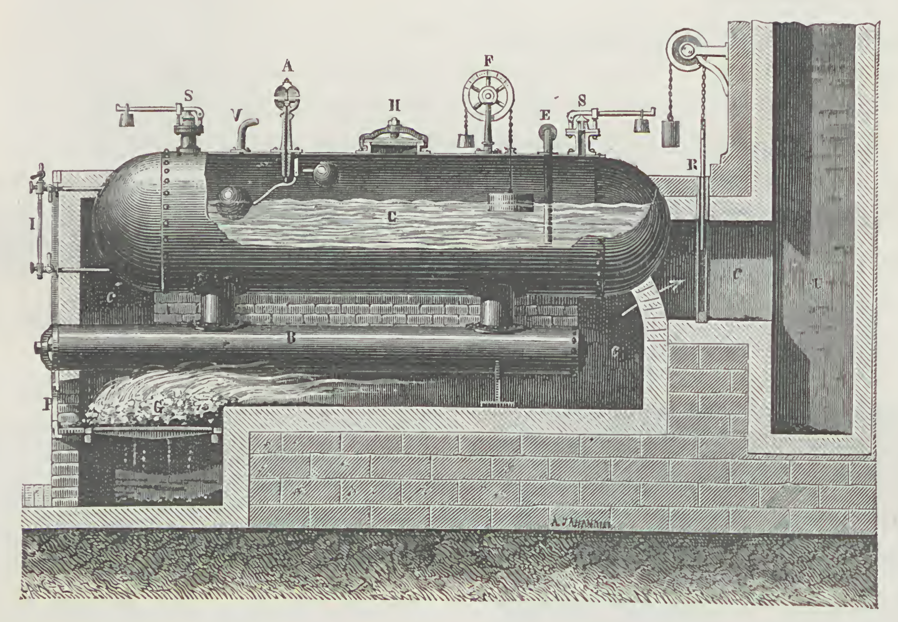


Fig. 224.—Caldera de dos hervidores: seccion longitudinal. A, flotador y silbato de alarma; B, hervidor; C, cuerpo de la caldera; E, tubo de alimentacion; F, flotador de cuadrante, indicador del nivel del agua; H, orificio (*trou d'homme*) para la limpieza; S, S, válvulas de seguridad; R, registro del tiro; U, chimenea; V, tubo de toma del vapor; *c*, *c*, humerales; I, indicador del nivel de agua; G, hogar; P, puerta del hogar

cantidad de calor que se consumiria estérilmente si al salir los gases del hogar pudieran perderse inmediatamente en la atmósfera.

Una prevision análoga es la que ha hecho inventar los hervidores. Las antiguas y primitivas calderas eran hemisféricas en su parte inferior, y no presentaban más que una escasa superficie á la accion del hogar, si se considera la masa de agua que era preciso vaporizar: no tenian sino una insignificante superficie de calefaccion. El aumento de esta superficie ha sido uno de los primeros adelantos en que han debido pensar los constructores de máquinas, habiendo sido Watt el primero. El asunto era economizar combustible, problema cuya solucion, despues de muchas investigaciones felices, y de muchos progresos realizados, es aún el *desideratum* de las industrias que se valen del vapor.

En vista de cuanto acabamos de decir, parece que si los gases procedentes de la combustion pudieran enfriarse al llegar á la base de la chimenea, á una temperatura igual, por ejemplo, á la del aire exterior, resultaria de esto una gran ventaja, puesto que el calor del hogar ó del combustible se utilizaria casi en su totalidad. Mas por desgracia esto no es posible, ó más bien si se lograra este resultado, cesaria el tiraje y la renovacion del aire necesario para alimentar la combustion, ó cuando ménos se aminoraria considerablemente. Ardiendo mal la hulla, no siendo el calor del hogar suficientemente intenso, los gases hidrógeno *proto* y *bi*-carbonados que en gran abundancia se desprenden del combustible, no podrian arder completamente. Ellos son los que forman la humareda espesa y negra que se ve salir con tanta intensidad siempre que se introduce en el

hogar, enfriándolo, una cantidad algo considerable de combustible fresco.

Así pues, al escaparse por la chimenea los gases calientes sirven para activar el tiraje; es un gasto necesario hasta cierto punto, áun cuando su resultado inmediato no sea la calefaccion del agua, ni la trasformacion de esta en vapor. Así es que con frecuencia sucede en la práctica industrial, que mirada por un lado, una innovacion que parece un progreso, resulta ser un retroceso considerada bajo diferente punto de vista.

Esta es la ocasion oportuna de decir algo acerca de la chimenea, que tan gran mision desempeña en el tiraje. Cuanto más alta es la chimenea de una caldera, continuando la misma seccion así como las demás condiciones de la combustion, más activo es el tiraje; pero no en la proporcion ordinaria ni con mucho; pues si se quiere obtener un tiraje de *doble* intensidad hay que *cuadruplicar* la altura de la chimenea; si de *triple*, habria que multiplicarla por 9: en una palabra, la altura crece en razon del cuadrado de la intensidad del tiraje.

Si este depende de la altura de la chimenea, tambien depende del volúmen del aire á que esta da paso, es decir, de la superficie de su seccion. Segun una regla formulada por Darcet, si la chimenea tiene 20 ó 30 metros de altura, la seccion deberá tener tantas veces un decímetro cuadrado de superficie cuantas veces se deban quemar por hora 4,5 ó 6 kilógramos de hulla. De suerte que la seccion de una chimenea de 20 metros de altura deberá ser igual á $\frac{180}{4,5}$ ó á 40 decímetros cuadrados si el hogar debe consumir en una hora 180 kilógramos de hulla. Si es redonda, su diámetro interior deberá ser igual á $0^m,75$, si cuadrada, el lado tendrá $0^m,63$.

Hay circunstancias en que se debe moderar el tiraje, lo cual se consigue de un modo muy sencillo por medio de un *registro* ó *válvula movible*, que se ve en R en la figura 224, y merced á la cual se disminuye como se quiera la abertura que presenta la chimenea al humo y á los gases de la combustion.

Hasta la parrilla, la forma y dimensiones de sus barrotes, los intersticios que estos dejan entre sí son elementos de gran importancia para la mejor marcha de un hogar, para la actividad del fuego, y por consiguiente para la vaporizacion del agua en su relacion con el gasto de combustible. Todo esto debe ser calculado, dispuesto, arreglado en vista de los datos de la ciencia y los de la experiencia.

Para terminar con el hogar de la máquina de vapor, diré una sola palabra sobre un asunto que ha metido cierto ruido en la industria. Hablo de la posibilidad de obtener lo que se llama un hogar *fumívoro*. La palabra fumívoro es bastante inadecuada, porque un hogar que produce humo jamás se ve libre de él y no lo extirpa sino expulsándolo por la chimenea ó por la puerta del hogar, lo cual, en el segundo caso, procede de un tiraje defectuoso. La verdadera cuestion es esta: instalar un hogar en que no se forme humo, ó hablando con más exactitud, en que al desprenderse los gases del combustible, se quemen lo más completamente que sea posible. Cuando el tiraje no proporciona una cantidad de aire bastante abundante, los carburos de hidrógeno incompletamente quemados se escapan en forma de humareda negra y espesa, sumamente molesta y sucia, pero que no quieren perder los propietarios de la fábrica por una razon más positiva, cual es la de que lo que se desperdicia de este modo sin haber producido calor es lo mejor de la hulla.

Pero este grave inconveniente de la falta de combustion puede resultar tambien, áun cuando no haya humareda. Además de los carburos hidrogenados de que acabamos de hablar, y que son los primeros en descomponerse tan luégo como empieza la combustion, contiene la hulla carbono que el oxígeno trasforma en óxido de carbono y luégo en ácido carbónico, si el tiraje suministra suficiente cantidad de aire. Si este es malo, el óxido de carbono se escapa sin haberse quemado completamente, y puede resultar una pérdida considerable de calor, áun cuando no haya humo. En una palabra, un hogar de los llamados *fumívoros* no es necesariamente económico.

Volvamos á nuestra caldera.

Hemos dicho ya cuál era la forma de conjunto del hogar y de los hervidores. Estos están enteramente llenos de agua que se eleva por el cuerpo de la caldera hasta cierta altura. El espacio libre que queda sobre el nivel del

agua es el que ocupa el vapor ántes de pasar á ejercer su accion en los órganos de la máquina, por cuya razon se le da el nombre de *depósito ó cámara de vapor.*

La cámara de vapor debe tener una relacion de dimensiones con la capacidad de la caldera, que en la práctica suele ser igual á una tercera parte. En otros términos, si el volúmen de agua es 8 ó 9, el de la cámara debe ser, poco más ó ménos, igual á 36, representando la unidad en este caso la cantidad de agua consumida, mejor dicho, vaporizada por hora. La razon del gran espacio dejado al depósito consiste en la necesidad de secar el vapor todo lo posible, pues este arrastra casi siempre consigo gotitas líquidas cuya introduccion en el cilindro es preciso impedir; pronto veremos por qué.

En cuanto á la proporcion que se da á la capacidad total de la caldera, relativamente á la cantidad de vapor que debe suministrar por horas en estado ó funcionamiento normal, está basada en el interés que debe haber en no variar demasiado de prisa la temperatura, lo cual sucederia si la alimentacion periódica de la caldera (que por lo comun suele hacerse con agua fria) introdujese de golpe una cantidad demasiado grande de líquido.

La fuerza prodigiosa que en sí encierra el vapor de agua á una temperatura alta, y que ejerce ante todo sus efectos en las paredes interiores de la caldera, exige que estas tengan una extraordinaria resistencia que no se logra sino mediante ciertas condiciones de forma, espesor y calidad de los materiales empleados.

La mejor forma, bajo el punto de vista de la resistencia, es la cilíndrica, terminando la caldera en ambos extremos por fondos ó casquetes hemisféricos. La materia adoptada generalmente es el hierro forjado de primera calidad, claveteando las placas con el mayor cuidado y solidez. Pero hoy la tendencia general es sustituir el acero al hierro, que es ménos resistente, sin ser mucho más económico. La caldera de las locomotoras es de cobre.

Hace algunos años que regian reglamentos especiales disponiendo el espesor que debian tener las placas segun las presiones medias, calculadas en atmósferas, que estaba destinada á soportar cada caldera. Hoy han caducado estas disposiciones, sustituyéndolas con una prueba oficial á la que cada constructor está obligado á someter sus aparatos (1).

IV

LOS APARATOS DE SEGURIDAD: INDICADORES DE NIVEL, FLOTADORES, MANÓMETROS

Hemos supuesto la caldera convenientemente llena de agua que, calentada á la temperatura necesaria, suministra al depósito cierta cantidad de vapor, la cual ejerce una presion que varía segun la máquina.

Es de grandísima importancia que el nivel del agua no baje demasiado en la caldera, ni que se eleve más allá de un límite determinado; en uno ú otro caso, se corre el riesgo de incurrir en una de las causas más frecuentes de explosion de las máquinas. Para evitarlo, se han ideado los aparatos conocidos con el nombre de *indicadores del nivel* y que en realidad merecen el de *aparatos de seguridad.* Son de muchas clases, y se suelen emplear simultáneamente los de varias.

Por esto suele verse adosado á las paredes exteriores de la caldera y bien á la vista un tubo de cristal que comunica por sus dos extremos con el interior de aquella (fig. 224). El agua penetra en este tubo y en virtud de la ley de equilibrio de los líquidos en los vasos comunicantes, llega al mismo nivel que en el generador. El cristal del tubo ha de estar bien limpio y trasparente, y por esto tiene un doble sistema de llaves que permiten interrumpir la comunicacion con la caldera para limpiar el tubo miéntras tanto. El maquinista no debe perder de vista jamás este aparato tan precioso como sencillo.

Un exceso momentáneo en la formacion del vapor, una mala marcha de la bomba de alimentacion ocasionada por un percance repentino, podrian hacer bajar bruscamente el nivel del agua y sorprender al maquinista miéntras estuviese ocupado en otra parte. Por consiguiente no basta el indicador de tubo de cris-

(1) Conviene, sin embargo, conocer la regla en cuestion, que los maquinistas utilizan siempre como medida de prudencia. Dicha regla es la siguiente: Valuábase el espesor en tres milímetros, á los cuales se añadia el producto de $1^{mm},8$ por el número de atmósferas y por el diámetro de la caldera medido en metros y fracciones de metro. Apliquemos esta regla á una caldera de $1^{m},20$ de diámetro, destinada á soportar una presion de 4 atmósferas y media. El espesor del hierro será $3^{mm} + 1^{mm},8 \times 1,20 \times 4,5$, es decir, $3^{mm}, + 9^{mm},7$, ó en total 12 milímetros y 7 décimas.

tal, y se añade á él alguno de los flotadores de los diferentes sistemas conocidos y que manifiestan con señales ruidosas el estado incompleto del nivel. Tales son, por ejemplo, los *flotadores de alarma* y el *flotador magnético.*

Un flotador se compone generalmente de una bola metálica hueca que sube y baja con el nivel del agua de la caldera. Está sostenido por una espiga que forma un brazo de palanca el cual gira alrededor del punto fijo; el otro brazo sostiene un contrapeso. En los límites normales del nivel del agua, el vástago mantiene una

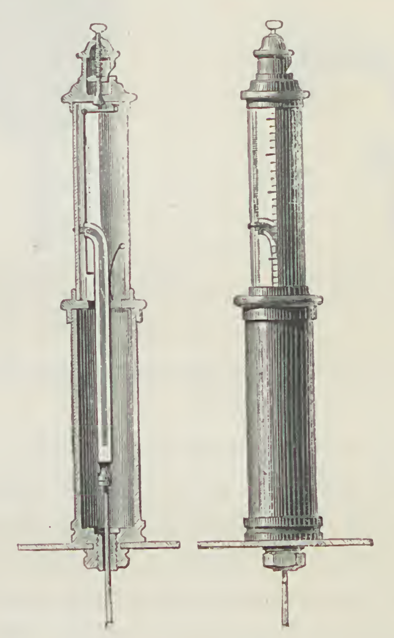


Fig. 225.—Indicador magnético de M. Lethuillier-Pinel

válvula contra la abertura de un tubo que comunica con el aire exterior. Si el nivel del agua desciende más abajo de estos límites, el flotador baja con él, siendo causa de que se destape la abertura de la válvula; entónces el vapor sube por el tubo y sale por un orificio anular donde encuentra los bordes agudos de un timbre A haciéndole vibrar de modo que produzca un sonido penetrante y prolongado.

Este sonido inusitado avisa al maquinista del riesgo que amenaza, y por eso se ha dado á este aparato el nombre de *flotador de alarma.*

El flotador indicador de cuadrante se compone de un disco de piedra con una cadena de suspension que, enrollándose en la garganta de una polea de cuadrante exterior F, sostiene un contrapeso. El movimiento que imprimen á la polea las variaciones del nivel se comunica á una aguja que indica así la altura del agua en la caldera.

En el *indicador magnético* de M. Lethuillier-Pinel, actualmente muy usado, conócese el movimiento del flotador por medio de un vástago que hace bajar ó subir con él un iman de herradura; delante de los dos polos de este iman hay una aguja imantada que se mueve atraida por él, y recorre las divisiones de una escala que marca el nivel del agua de la caldera. Cuando este nivel baja de un modo anormal y peligroso, el iman arrastra consigo el brazo de una palanca que abre una válvula sujeta por un muelle. El vapor que desde la caldera entra en el tubo que contiene todo el mecanismo, sube al exterior silbando y avisa al maquinista del peligro.

Los aparatos de seguridad de una máquina de vapor no comprenden solamente los indicadores de nivel, flotadores y otros por el estilo, pues las causas de explosion no proceden exclusivamente de insuficiencia de agua en el generador; en circunstancias que más adelante indicaremos, el vapor puede adquirir una fuerza elástica que traspase de pronto y con exceso los límites de presion que se han tenido en cuenta al construir la caldera. Para prever este caso, se adaptan á esta válvulas de seguridad cuya estructura ordinaria se representa en SS (figura 224). Su modo de funcionar es tan sencillo, que juzgamos inútil describirlo detalladamente. En realidad no son otra cosa sino la válvula de la marmita de Papin, de la cual hemos tratado al describir el Digestor del célebre inventor.

Fáltanos aún decir cómo es posible cerciorarse á cada momento miéntras funciona una máquina de vapor, de las variaciones de la tension de este. Los instrumentos que las indican en atmósferas y fracciones de atmósfera, se llaman *manómetros.*

No todos los manómetros que se usan están basados en el mismo principio. Unos, como el *manómetro de aire libre* (fig. 226), son simplemente barómetros de sifon con el brazo mayor *b* abierto: sólo que en él no es la presion del aire atmosférico la que levanta la columna de mercurio, sino la presion del vapor, á cuyo efecto el brazo menor del manómetro está en comunicacion directa con la cámara de vapor de la caldera. La diferencia de las alturas del mercurio en los dos brazos, á la cual se agrega la

presion barométrica, es la que marca la del vapor.

Los *manómetros de aire comprimido* (figuras 227 y 228) son en realidad tubos de Mariotte. El vapor ejerce libremente por uno de sus brazos la presion que está equilibrada en el otro brazo por el aire comprimido y además por la diferencia del nivel de agua. El instrumento está construido de suerte que el mercurio se halla á igual altura *m n* en ambos brazos, si la presion del vapor equivale á una atmósfera. Cuando esta presion va siendo gradualmente mayor, el nivel se eleva en A, pero á alturas

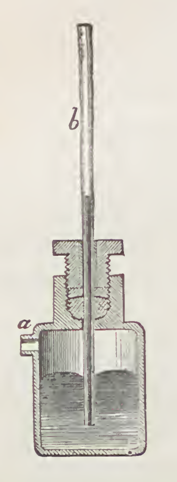


Fig. 226.—Manómetro de aire libre

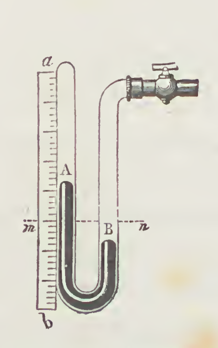


Fig. 227.—Manómetro de aire comprimido

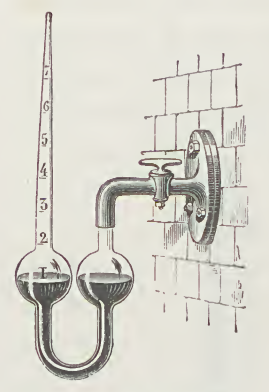


Fig. 228.—Manómetro de tubo cónico

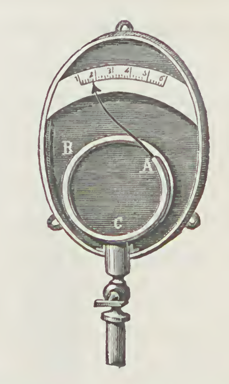


Fig. 229.—Manómetro metálico de cuadrante

decrecientes para aumentos iguales de presion, segun la ley de Mariotte. Así pues, cuanto más altas son las presiones, ménos sensible va siendo el instrumento, inconveniente que se remedia dando al instrumento la forma que representa la figura 228. La forma cónica del brazo lleno de aire da longitudes casi iguales á las divisiones correspondientes á las atmósferas sucesivas, de suerte que se ve más fácilmente que con el primer sistema la indicacion de las presiones elevadas.

La comodidad y baratura de los manómetros metálicos ha hecho que se adopten en un gran número de máquinas; pero no ofrecen tantas garantías de exactitud como los otros, porque las piezas que soportan la presion del vapor pueden desgastarse con el uso. Como estas piezas indican, por medio de la mayor ó menor curvatura que les imprime la fuerza elástica del vapor, el valor de este, hay que someterlas de vez en cuando á comprobaciones y compulsas con los manómetros más exactos. El inconveniente de estos procede principalmente de la materia de que están compuestos, del cristal que se empaña y pierde su trasparencia y á través del cual hay que observar el mercurio, de su fragilidad; sucediendo tambien que el mercurio del manómetro de aire comprimido se oxida, lo cual disminuye el volúmen del aire, y entónces el instrumento marca presiones más altas que la verdadera.

Tal es, en sus partes esenciales, el aparato generador de vapor conocido en la práctica con el nombre de *caldera*. Ya hemos dicho que esta varía mucho en cuanto á sus formas y dimensiones, segun los tipos de máquinas á las cuales suministra la fuerza ó el motor. Más adelante tendremos ocasion de ver algunas de las formas más usadas y originales de las calderas en las máquinas fijas, en las navales y en las movibles, locomotoras ó locomóviles.

V

PRINCIPALES TIPOS DE CALDERAS DE VAPOR

Cuando se quiere hervir agua en una olla ó marmita, lo que naturalmente se ocurre es poner esta al fuego, sin que nadie piense en poner el fuego dentro de la marmita, lo cual pareceria contrario al sano juicio.

Y sin embargo, lo segundo es lo que se les ha ocurrido á los constructores de máquinas de vapor. En lugar de poner la caldera al fuego, han calculado que seria más ventajoso proceder al revés y meter el fuego en la caldera. De este modo se conseguiria en mayor grado el aprovechamiento de combustible, esa primera condicion de la industria del vapor.

En la caldera de hervidores que acabamos de describir, aquella está sobre el fuego; es un generador de *hogar exterior.* Pero tambien hay generadores de *hogar interior*, y por esto sólo, pueden formarse dos tipos de calderas, que se subdividen además en numerosas variedades. Por último, distínguese un tercer tipo, aquel en que el hogar propiamente dicho es exterior y cuyos humerales ó conductos de los gases de la combustion están situados dentro del recipiente que contiene el agua. Estos son las calderas ó generadores *mixtos.*

Las primeras calderas adoptadas para las máquinas de Watt eran en forma de carro ó de *nicho.* La llama, despues de calentar directamente la superficie cóncava inferior, volvia sobre sí misma por los conductos de humo laterales. Más adelante empleóse en los primeros buques de vapor; pero entónces se añadió un humeral interior por donde pasaban los gases de la combustion ántes de entrar en los laterales, de suerte que se formaba así una caldera mixta.

La forma de las paredes de la caldera de nicho ó tumba la hace poco resistente; así es que la historia de los accidentes de las máquinas de vapor demuestra que la mayor parte de las explosiones han ocurrido en calderas de este sistema, por cuya razon en casi todas partes las han sustituido con otras.

Hemos descrito la caldera de dos hervidores inferiores; pero á veces no hay más que un hervidor, y otras se ponen hasta tres. Un sistema interesante y original á la vez es el de hervidores laterales de la caldera Farcot. En este sistema (fig. 230) el cuerpo cilíndrico principal A está calentado directamente por el hogar. Cuatro hervidores colocados lateralmente uno sobre otro están situados en una construccion lateral dividida en cuatro compartimientos ó humerales, por los cuales tienen que pasar sucesivamente los gases de la combustion ántes de desembocar en la chimenea. Además, el hervidor inferior A' es el que recibe el agua de alimentacion. Como los gases caminan de arriba abajo miéntras que el agua sigue un camino inverso para ir del hervidor inferior á la caldera, resulta que son las partes más calientes de los gases las que se ponen en contacto con las paredes más calientes de la caldera; las partes más frias pierden todavía calor calentando el agua más fria ántes de escaparse por la chimenea.

Supongamos que el cuerpo cilíndrico de una caldera contiene un tubo inferior de suficiente diámetro enteramente rodeado de agua; que se coloca el hogar en este tubo en lugar de hacer de él tan sólo un humeral: entónces se tendrá una caldera de hogar interior. En este sistema se aprovecha todo el calor del hogar, empleándolo en la calefaccion directa de las paredes metálicas de la caldera, sin que la absorban los ladrillos de la obra en que descansa. Pero

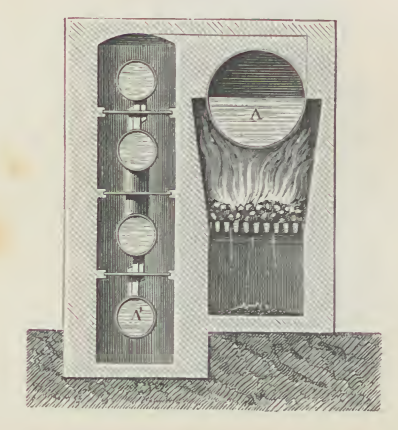


Fig. 230.—Caldera de hervidores laterales; sistema Farcot

no seria aún bastante grande la superficie de calefaccion si la caldera no estuviese rodeada exteriormente de humerales, pues entónces los inconvenientes de un hogar necesariamente reducido no estarian compensados por las ventajas de esta disposicion. Sin embargo, en Inglaterra se emplean para las máquinas fijas calderas horizontales de uno ó dos hogares interiores.

En la mayor parte de las modificaciones introducidas en las calderas primitivas se nota la preocupacion de dar todo el posible desarrollo á la superficie de caldeo, procurando á la vez reducir el volúmen y el espacio ocupado por el generador. Y con efecto, segun hemos visto, esta es la gran cuestion en cuya solucion están interesadas la fuerza de la máquina y la economía de combustible. Los hervidores, los conductos de humo interiores ó exteriores, los hogares interiores, todo esto está ideado con el objeto de utilizar la actividad del hogar de modo que no se escape por la chimenea sino la porcion de gases calientes necesaria para producir la corriente ascendente, esto es, el tiraje.

Por último, poco á poco se llegó á idear la

caldera tubular, cuya primera idea se remonta á Barlow (1793), pero que no fué realizada hasta 1829 por Marc Seguin y Stephenson. Hé aquí en qué consiste el sistema de calderas tubulares, que aplicadas al principio á las locomotoras de las vías férreas, se han adaptado á las máquinas de navegacion con las modificaciones indispensables.

En el cuerpo cilíndrico principal van soldados paralelamente entre sí varios tubos que por

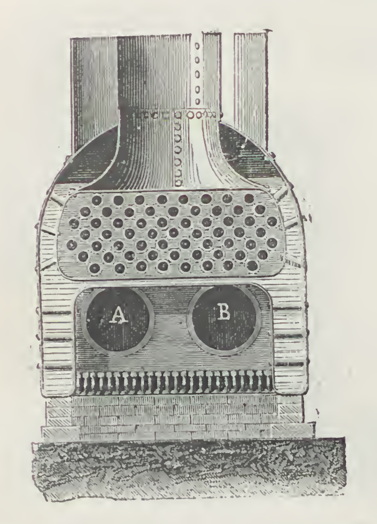


Fig. 231.—Caldera tubular marina, de retorno de llama

un lado van á parar al hogar y por el otro á los humerales ó á la chimenea. Estos tubos están bañados por el agua de la caldera, que llena todos sus intervalos y que está calentada directamente por los gases que atraviesan todos los espacios tubulares. Más adelante veremos en qué proporcion tan enorme aumenta en virtud de esta disposicion ingeniosa la superficie de calefaccion y por consecuencia el poder de vaporizacion del generador.

En las locomotoras, locomóviles y calderas marinas, el hogar está rodeado de agua por todas partes ménos por su base, de suerte que tambien podria considerarse la caldera tubular como de hogar interior, y la verdad es que reune todas las ventajas de estas.

La figura 231 es un ejemplo de una caldera tubular marina, que es al mismo tiempo una caldera de *vuelta* ó *retorno de llama* por cuanto los gases del hogar ántes de lamer los tubos, pasan por dos grandes cilindros A y B, se reflejan en el fondo de la caldera, y vuelven por los conductos tubulares á la chimenea, saliendo por ella.

Además de los tipos que acabamos de definir, hay tambien calderas cuyo hogar se saca cuando se quiere, *de hogar amovible*, segun la expresion técnica. Esta disposicion puede ofrecer varias ventajas, especialmente la de una limpieza rápida y la facilidad de arrancar las incrustaciones. Hay tambien calderas de *circulacion de agua*, formadas principalmente de tubos en los que se introduce continua y sucesivamente el agua que casi al punto se vaporiza, de suerte que si se interrumpe su introduccion, queda tambien interrumpida la produccion y la salida del vapor; calderas *calentadas con gas*, empleadas por lo comun en los hornos altos, en los que se aprovechan de este modo los gases perdidos al salir del tragante, etc., etc.

De todos estos sistemas de calderas nos fijaremos en uno solo, que nos mostrará cómo pueden construirse generadores de modo que sean, digámoslo así, inexplosibles, por la circunstancia de que tan luégo como se introduce el agua queda convertida en vapor; nos referimos á la caldera de circulacion de M. de Belleville, cuyo uso va extendiéndose de dia en dia en las industrias de no gran importancia, en los centros populosos, y que se utiliza principalmente en las imprentas y fábricas de Paris.

Una serie de tubos verticales situados en el

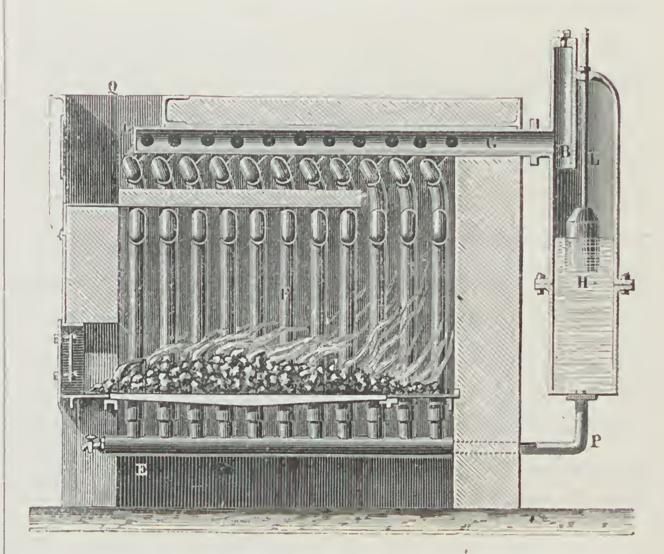


Fig. 232.—Caldera de circulacion: sistema Belleville

hogar mismo (fig. 232), comunica por un lado con un tubo horizontal E que conduce el agua de alimentacion, y por otro con el tubo B de introduccion del vapor. Cada tubo está lleno de agua hasta una altura que es la misma para todos y forma, por decirlo así, una pequeña caldera medio llena de agua y de vapor.

Regúlase la entrada del agua en los tubos por medio de un aparato especial, por la presion misma del vapor, de suerte que á medida que el agua se vaporiza, la sustituye otra cantidad de agua igual, quedando así constante el nivel en los tubos de la caldera.

La formacion del vapor es, por decirlo así, inmediata; en una caldera de este sistema de un volúmen inferior á 4 metros cúbicos ($3^m,74$) y de 10 metros cuadrados de superficie de calefaccion, la vaporizacion es de 200 kilógramos de agua por hora.

Todavía hay otros sistemas de calderas de circulacion: en Francia los de MM. Isoard, Clavières, Larmanjat y Boutigny; en Inglaterra, los de M. Scott, Howard, Hayward, Tyler y Field, pero sólo podemos mencionarlos, resumiendo en pocas líneas las ventajas respectivas de las grandes calderas comunes comparadas con estos sistemas nuevos.

Las primeras tienen en su favor la sancion de una larga experiencia; producen el vapor necesario sin necesidad de mucho cuidado ni entretenimiento, y con gran regularidad; su manejo diario es sencillo y cómodo. Pero ocupan mucho sitio y están sujetas á explosiones.

Por el contrario, las calderas de circulacion, mucho ménos voluminosas, más baratas, y por decirlo así, inexplosibles, tienen la ventaja de formar el vapor rápidamente; pero requieren prolijos cuidados, no son más económicas que aquellas por lo que hace al combustible, pareciendo reservadas especialmente para las máquinas de la pequeña industria.

Tenemos ya formado el vapor: veamos ahora cómo se utiliza su fuerza elástica, ó si se quiere, cómo se emplea esta fuerza para imprimir el movimiento á los órganos de la máquina.

CAPITULO VIII

LA MÁQUINA DE VAPOR.—EL MECANISMO MOTOR

I

EL CILINDRO MOTOR

El vapor sale del depósito de la caldera por un tubo que lo conduce al interior de un cilindro; alternativamente obra sobre una de las dos caras de un émbolo movible en dicho cilindro, y de esta accion alternativa resulta un movimiento de vaiven del émbolo y de su vástago.

Al pasar el vapor desde la caldera al cilindro, ejerce ante todo su accion en una de las caras del émbolo y lo empuja hácia el extremo opuesto. En este momento, el vapor debe penetrar por el otro lado del cuerpo de bomba para ejercer su accion en la otra cara del émbolo. Para que esta nueva accion sea posible hay que extraer el vapor que acaba de obrar en sentido inverso, porque la fuerza elástica que conserva todavía se opondria al movimiento. Lógrase este resultado, dando alternativamente al vapor que ha llenado ya su cometido una salida al exterior del cilindro. El espacio á donde pasa es unas veces el aire libre, y otras un receptáculo vacío de aire y mantenido á una baja temperatura, merced á un chorro contínuo de agua fria.

En el primer caso, que es siempre el de las máquinas en que el vapor funciona á *alta presion*, es decir, con una fuerza elástica igual á muchas atmósferas, el flúido que acaba de trabajar se escapa, y su tension queda rápidamente reducida á la de la misma atmósfera, lo que permite al vapor obrar sobre la superficie opuesta al émbolo.

En el segundo caso el vapor se condensa bruscamente á causa de su introduccion en el espacio vacío y frio (que por esta razon se llama *condensador)*. Su fuerza elástica, que apénas excedia de una atmósfera, queda anulada instantáneamente ó por lo ménos muy reducida, de suerte que la cámara del cilindro en la que acaba de funcionar queda á su vez vacía; y por lo tanto el vapor introducido por el otro lado

no tiene ya ningun obstáculo que vencer sino el émbolo mismo.

Los diferentes mecanismos ideados para conducir de este modo el vapor en el cilindro á uno y á otro lado del émbolo, y luégo al aire libre ó al condensador, con objeto de destruir ó reducir su fuerza elástica tan luégo como la ha empleado, constituyen lo que se llama *distribucion del vapor;* vamos á ver cuáles son los principales sistemas empleados con este objeto:

Ocupémonos ante todo del *cilindro*, que es la pieza capital del mecanismo motor.

Por lo comun consiste en una pieza de hierro fundido (fig. 235), cuyo interior, de forma perfectamente cilíndrica, ha sido torneado y limado con el mayor esmero; uno de sus fondos está á veces fundido con la misma pieza y otras atornillado sólidamente como el otro fondo, de modo que se puede quitar enteramente uno de los dos para meter el émbolo.

Uno de los fondos da paso al vástago *tt* del émbolo P, y la abertura que sirve para este objeto está provista de una caja de estopa *(stuffing-box)*, á fin de que el vástago al subir y bajar no presente ningun escape al vapor del cilindro.

En cuanto al émbolo, se construye de muy distintos modos. Por lo comun está formado de dos platillos ó discos metálicos de un diámetro algo más pequeño que el del cilindro y sólidamente unidos entre sí así como al vástago que los atraviesa. En su contorno, hay practicadas unas muescas ó gargantas para meter la *guarnicion*, es decir, la parte del émbolo cuya superficie exterior debe rozar suavemente, pero con perfecta adherencia, con la superficie interior del cilindro, de modo que el vapor no pueda pasar de una de las cámaras á la otra. Antes consistia la guarnicion en un trenzado de cáñamo que era menester engrasar á menudo y hasta cambiarlo á causa de la rapidez con que se estropeaba. Hoy se le ha sustituido ventajosamente con guarniciones metálicas, formadas de fragmentos de anilla comprimidos por muelles interiores, como se ve en la figura 233; siendo tambien preferido á este método el de los émbolos Ramsbottom, cuyo cuerpo se compone de un solo disco hueco para que sea más ligero y rodeado de dos aros de acero dulce fundido, que penetran en dos gargantas exteriores y sobresalen algun tanto. La superficie de estos círculos ejerce así presion sobre las paredes del cilindro, formando una excelente guarnicion, muy sencilla y poco costosa. El émbolo sueco (figura 234) no difiere del anterior sino por la

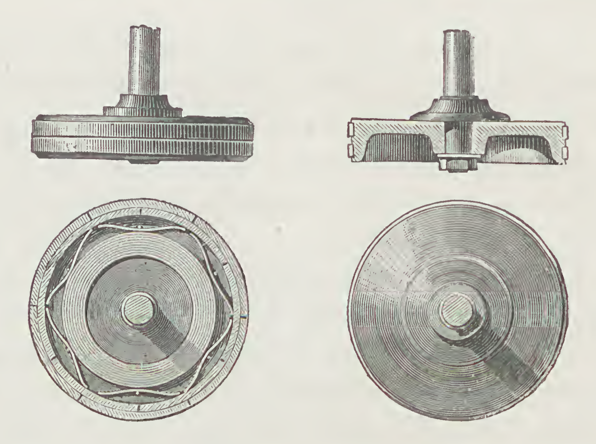


Fig. 233.—Embolo de muelle *Fig. 234.*—Embolo sueco

anchura de los aros, que es mayor, y por su composicion que es de hierro fundido endurecido con un poco de estaño.

II

DISTRIBUCION DEL VAPOR

Construidos y arreglados de este modo el émbolo y el cilindro, fáltanos ver cómo se verifica la introduccion y la salida, en una palabra, la *distribucion del vapor*.

Examinemos la figura 235, que representa la

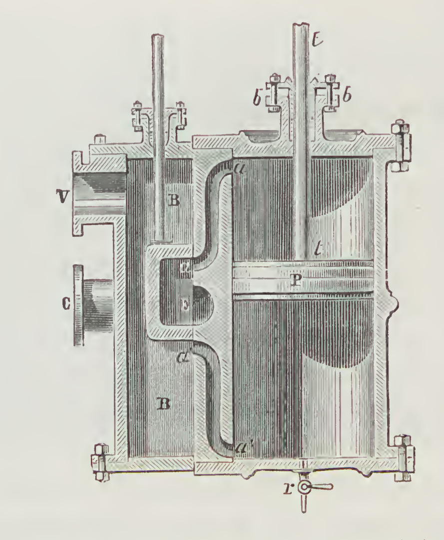


Fig. 235.—Seccion longitudinal de un cilindro

seccion longitudinal del cilindro. Vése en *a a'*, cerca de cada uno de los fondos, la abertura de un doble conducto, *a a*, *a' a'*, practicada en el espesor de la cara lateral; son los orificios por donde llega el vapor alternativamente, empu-

jando ya una cara ya otra del émbolo: dáseles el nombre de *orificios* ó *registros de admision.* Estos dos orificios desembocan exteriormente en una cara bien recta, y entre las dos se ve una tercera abertura, E, que sirve para que el vapor

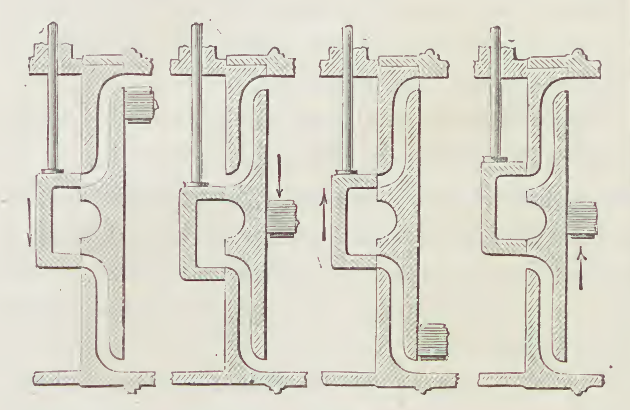


Fig. 236.—Fases del movimiento de vaiven del émbolo y de la caja de distribucion

se escape cuando ha producido su efecto, por cuya razon se la llama *registro de escape.* Por este tubo pasa el vapor á esparcirse por el aire ó á perder su fuerza elástica en el condensador.

Ahora ¿en virtud de qué mecanismo se opera la distribucion, compuesta, como se ve, de dos operaciones parciales, la introduccion y la salida del vapor, que deben repetirse dos veces para tener una fase completa del movimiento de vaiven de la caja de distribucion? Este mecanismo varía segun las máquinas; describamos desde luégo el que representa nuestro grabado.

En la *caja de vapor* B B, se ve otra prismática abierta por un lado, la cual lleva los nombres de *caja de distribucion* ó simplemente *distribuidor.* Esta se aplica por su lado abierto contra el plano bien recto en que, segun hemos visto, desembocan exteriormente los tres registros. El espacio B B se llama caja de vapor, porque en efecto el vapor salido de la caldera pasa á ella libremente por el tubo V; pero la capacidad de la caja de distribucion está, por el contrario, cerrada al vapor afluente, al paso que este comunica siempre con el tubo de salida, y tambien con uno ó con otro de los conductos de admision del cilindro.

Por último, la misma máquina imprime el movimiento á la caja de distribucion por medio de una barra y de una excéntrica sujeta al árbol del volante.

Observando el movimiento sucesivo y alternado de la caja de distribucion, representado en la fig. 236, se comprenderán fácilmente las fases de la distribucion del vapor.

Tal es el mecanismo de esta distribucion en las máquinas en que se ha adoptado la *caja de distribucion de conchas.* Pero, segun hemos dicho, se han empleado y se emplean todavía otros mecanismos. Estos mecanismos son en primer lugar el sistema de las *válvulas de distribucion* de Watt; luégo la *caja de distribucion de émbolos,* debida al mismo inventor, y por fin, la *caja de distribucion en D,* cuyo nombre se debe á la semejanza de la seccion de la pieza principal con la letra D (figura 237).

En el primero de estos sistemas hay dos cajas con válvulas adaptadas á los dos extremos del cuerpo del cilindro. Cada una de ellas está dividida por dos válvulas movidas por un sistema de varillas en tres compartimientos, estando el de en medio en comunicacion directa con cada orificio; al paso que los otros dos comunican, el superior con el tubo de vapor; el inferior con el aire exterior ó con el condensador.

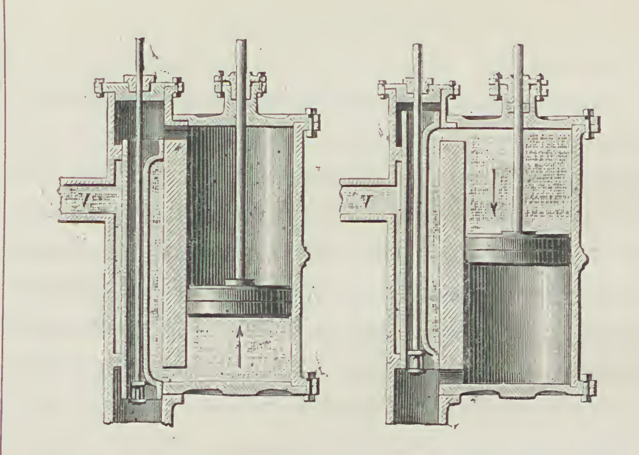


Fig. 237.—Distribucion del vapor; caja de distribucion en forma de D

La caja de distribucion de émbolos se llama así porque consiste en dos émbolos, movidos por una espiga en un espacio cilíndrico contiguo al cilindro, que tan pronto dejan que el vapor penetre libremente en uno de los orificios ó registros de admision y en la cámara correspondiente del cilindro, como ponen esta cámara y el vapor que acaba de obrar en ella en comunicacion con el condensador.

Por último, la *caja de distribucion en forma de D* (fig. 237) es una pieza hueca, movible en

la caja de vapor, que se aplica y resbala por sus dos extremos planos contra la cara del cilindro á la que van á parar los orificios de admision. El vapor que procede de la caldera por el orificio V puede circular siempre alrededor de la caja de distribucion sin penetrar jamás por uno ni por otro de sus extremos; al contrario, estos se hallan de continuo en libre comunicacion con el condensador. Así pues, los dos bordes planos de la caja de distribucion dejan alternativamente, en su movimiento de vaiven, que uno de los orificios reciba el vapor de la caldera, miéntras que el vapor, despues de ejercer su accion en el émbolo, sale por el otro orificio y se precipita en el condensador ó al aire libre.

En cada uno de estos sistemas de distribucion, es fácil comprender los movimientos correspondientes del émbolo, de las cajas de distribucion y de las válvulas en sus diferentes fases. Lo que hemos dicho con respecto á la caja ó distribuidor de conchas bastará para dar una idea de ello.

III

EXPANSION DEL VAPOR

Considerando las subidas y bajadas correspondientes del émbolo y de las diferentes piezas que constituyen el sistema de distribucion del vapor, se ve que hemos supuesto siempre que los dos orificios del cilindro tenian la misma anchura que las bandas macizas del distribuidor ó caja de distribucion, de suerte que tan pronto estaban cerrados como abiertos. De aquí resulta que el vapor de la caldera afluye totalmente á cada cara del émbolo durante todo el movimiento de este, lo cual se expresa diciendo que el *vapor trabaja á toda presion.*

En un principio no se conocia otro modo de hacer funcionar el vapor. Watt, cuyo nombre figura en casi todos los descubrimientos capitales que han trasformado la máquina de vapor primitiva, conoció que habia una doble ventaja en no dar acceso al vapor á cada lado del cilindro sino durante una parte tan sólo de la marcha del émbolo, de lo cual resultaba ante todo mayor regularidad en el movimiento mismo, y luégo, á trabajo igual, una notable economía de vapor y por consiguiente de combustible.

El flúido, introducido por ejemplo tan sólo durante el primer tercio de la marcha del émbolo, continúa ejerciendo su accion sobre este, pero como el espacio que en seguida ocupa va aumentando hasta el fin, obra dilatándose como un muelle que se distiende, de suerte que su fuerza disminuye hasta que el émbolo termina su movimiento. En este caso se dice que *el vapor trabaja con expansion.*

Este sistema es el que se ha adoptado hoy casi universalmente. Pero ántes de fijarnos en las ventajas que presenta y de precisar la economía de vapor ó de combustible que origina la expansion, es menester que digamos en virtud de qué modificacion del mecanismo se logra obtenerla.

Si me propusiera escribir un tratado completo de la máquina de vapor, tambien podria describir aquí diferentes sistemas de expansion; mas para el objeto que me propongo, será suficiente dar una idea de uno ó dos de los más importantes.

Empecemos por el *sistema de expansion*, llamado de *Clapeyron*, porque su mecanismo se debe á este sabio ingeniero.

Consiste en una simple modificacion de la caja de distribucion, ó más bien de la anchura de las bandas que cierran los registros. En vez de dar

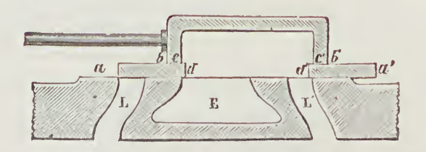


Fig. 238.—Sistema de expansion de Clapeyron

á esta anchura la dimension exacta de la de cada registro, se la hace un poco mayor. Los rebordes *a b*, *a' b'*, *c d*, *c' d'*, exteriores é interiores, forman lo que se llama *recubrimiento* del repartidor, porque su objeto es disminuir la duracion de la entrada del vapor en el cilindro por cada uno de los dos registros. Tendríamos que descender á detalles demasiado prolijos y técnicos para seguir el movimiento del distribuidor de expansion en todas sus fases y para hacer ver con toda claridad cómo funciona el vapor en las mismas fases; pero podemos resumir esta explicacion, diciendo que cada introduccion del flúido en el cilindro da lugar á cuatro períodos sucesivos que vamos á caracterizar.

En el primer período hay *admision de vapor*

que trabaja durante este tiempo á toda presion, es decir, á la presion de la caldera; despues de lo cual el orificio de admision se cierra.

En el segundo hay *expansion del vapor* introducido, que trabaja entónces con una fuerza decreciente, hasta el momento en que se abre el orificio de escape.

El escape caracteriza, pues, el tercer período, pero como á consecuencia del recubrimiento, cesa ántes que el émbolo haya llegado al fondo del cilindro, queda en este cierta cantidad de vapor que el émbolo empuja y comprime un poco ántes del principio del nuevo período de admision.

De aquí resulta el *período de compresion* que termina el ciclo de los movimientos alternativos del distribuidor y vuelve al émbolo á la misma posicion que al principio.

La expansion de Clapeyron es la que principalmente se emplea en las máquinas de movimientos rápidos, como las locomotoras.

En el sistema de expansion de Meyer, la caja de distribucion tiene dos orificios que comunican alternativamente con los registros de admision; son dos bloques con un movimiento independiente del de dicha caja que cierran estos registros, haciendo cesar la entrada del vapor y empezar la expansion de este.

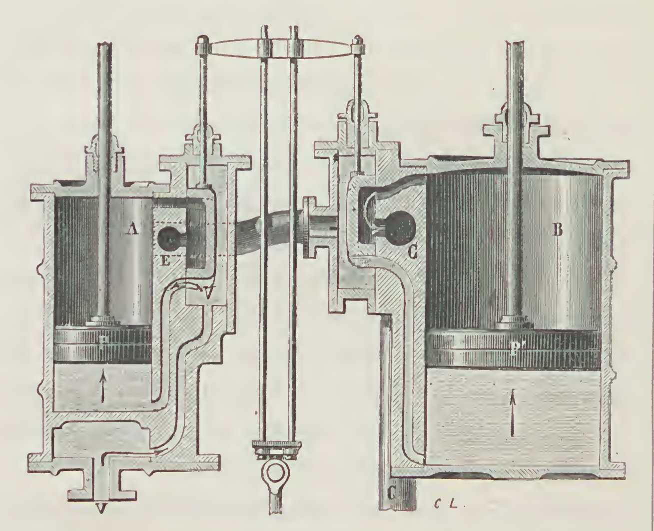


Fig. 239.—Seccion de los dos cilindros en el sistema de expansion de Wolff

En el sistema de Wolff, la expansion no se verifica en el cilindro mismo, sino en otro cilindro de mayor diámetro contiguo al primero (figura 240), por cuya razon se da á las máquinas que emplean este sistema de expansion el nombre de *máquinas de dos cilindros.*

La figura 239 va á hacernos comprender el mecanismo de la distribucion en estas máquinas.

Cada uno de los dos cilindros A B, está provisto de una caja de vapor en la cual se mueve

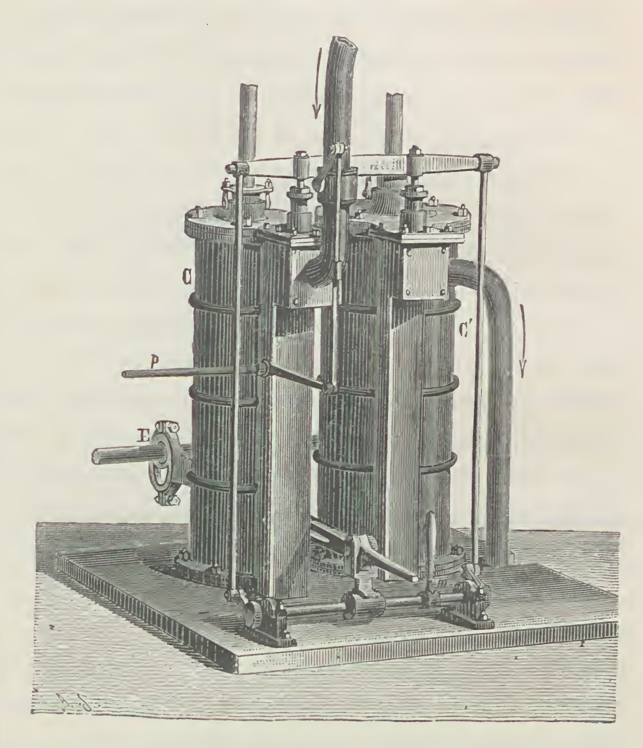


Fig. 240.—Sistema de distribucion y de expansion de Wolff

un distribuidor ordinario, y los orificios de admision y de escape dispuestos como ya es sabido.

El vapor de la caldera llega por el orificio V, y al principio se esparce por la caja del cilindro A, penetrando en seguida por debajo del émbolo P, por ejemplo. Este émbolo recibe pues un movimiento de abajo arriba; repele el vapor que habia en el otro lado al tubo de escape E, el cual en vez de comunicar con el condensador como en las máquinas de un solo cilindro, desemboca en la caja de vapor del cilindro B. Allí penetra por el registro inferior de admision por debajo del émbolo P', y distendiéndose, produce asimismo el movimiento ascendente del émbolo. Por lo que hace al vapor que habia al otro lado en la cámara superior del cilindro mayor, va como siempre á condensarse en el tubo C C ó al aire libre.

El movimiento simultáneo de los dos distribuidores en sentido inverso dará lugar á un movimiento de arriba abajo de los dos émbolos, y el vapor obrará á toda presion en el cilindro pequeño, al paso que en el mayor obra siempre con expansion.

IV

EL MECANISMO DE TRASMISION

Réstanos demostrar cómo se trasmite el movimiento del émbolo, en virtud de qué mecanismo se le trasforma, se le arregla, se asegura su continuidad regular. El problema que se ha de resolver no es peculiar á las máquinas de vapor. Cualquier otro motor puede dar lugar á que se plantee la misma cuestion. «Dado el movimiento de vaiven de la barra de un émbolo, es decir, un movimiento alternado y rectilíneo, hallar un modo de trasmision que lo convierta en movimiento continuo y circular, que haga girar, por ejemplo, un árbol motor el cual haga á su vez dar vueltas simultáneamente, ó cuando sea necesario, á todas las máquinas y aparatos parciales de una fábrica ó taller.»

Mencionemos someramente todos los sistemas al efecto discurridos.

El más antiguo, adoptado todavía en un gran número de máquinas, comprende las *de balancin*, cuyo principio se manifiesta en la fig. 241.

El vástago *t* del émbolo, cuyo extremo describe una línea recta vertical, está unido al extremo de una gran pieza oscilante, ó palanca A B, á la cual hace mover alrededor de un punto fijo I, en un plano vertical. Esta pieza es el *balancin* en cuyo extremo opuesto se articula una barra ó *biela* que actúa á su vez sobre una manivela ensamblada en O al árbol que hay que poner en movimiento. Gracias á esta disposicion, el movimiento rectilíneo alternativo del émbolo se trasforma en movimiento circular continuo.

Aquí, el balancin está sobre el vástago del émbolo, pero tambien puede estar debajo, y ya veremos ejemplos de esta disposicion en las máquinas de vapor marinas que tendremos ocasion de describir más adelante.

Acabo de decir que por medio del balancin, de la biela y de la manivela, el movimiento alternativo y rectilíneo del émbolo se trasforma en circular y continuo; pero esta trasformacion no es directa, porque los extremos del balancin oscilan describiendo cada uno un arco de círculo, ora en un sentido, ora en otro: así pues, el movimiento es desde luégo circular alternativo, y la biela y la manivela acaban la trasformacion y producen la continuidad del movimiento circular.

Resulta de aquí, que el vástago del émbolo no puede sujetarse directamente al extremo del balancin, á causa de moverse en sentido vertical, pues de lo contrario, este le obligaria á seguir el contorno del arco, y por consiguiente, lo torceria tan pronto á derecha como á izquierda. Para obviar este inconveniente, que deterioraria muy pronto la máquina, Watt imaginó un sistema de articulacion muy ingenioso, conocido con el nombre de *paralelógramo de Watt* y cuya sucinta descripcion es la siguiente:

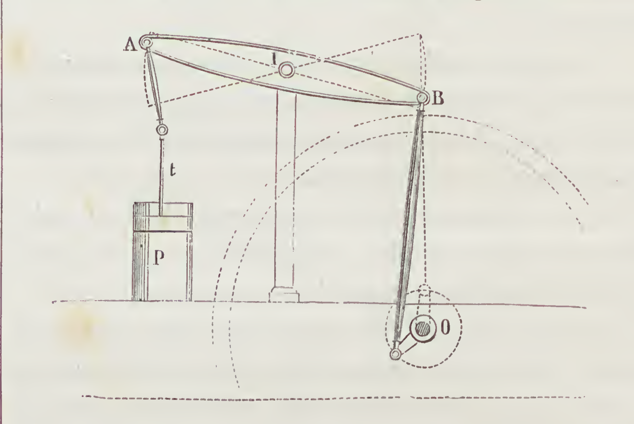


Fig. 241.—Principio de la trasmision en las máquinas de balancin

El vástago del émbolo, en lugar de estar directamente unido con el extremo E del balancin (fig. 242), lo está con el vértice D del paralelógramo C B D E, cuyos cuatro lados, rígidos y de dimensiones invariables, se articulan con los vértices, de suerte que los ángulos varian segun el movimiento que imprimen las oscilaciones del balancin. Además, el vértice B está sujeto por un vástago B O ó un punto fijo O del cuerpo de la máquina. Las longitudes relativas de estas diferentes líneas están calculadas de tal suerte que el vértice D describe una línea recta vertical, miéntras que los puntos C, E, B, trazan arcos de círculo, teniendo por centros los dos puntos O O. Verdad es que para que así suceda, la oscilacion del balancin no debe exceder de 20 grados á una y otra parte de la horizontal. El punto medio del lado B C goza de la misma propiedad que el punto D; así es que se le utiliza en las máquinas de Wolff, en las que los émbolos de los dos cilindros deben moverse de concierto.

Compréndese que el sistema que acabamos de describir se reproduce del propio modo á

cada lado del balancin en el sentido de su espesor, lo cual hace que en realidad el vástago del émbolo esté articulado con un eje horizontal que enlaza los dos puntos D.

V

LOS REGULADORES

Se ve, examinando la figura 244 que en el árbol motor movido por el sistema de biela y de manivela descrito más arriba, va montada una gran rueda, de hierro fundido por lo comun, á la cual se da el nombre de *volante*. Esta pieza, que todas las máquinas motoras llevan, tiene por objeto regularizar el movimiento.

En una máquina motora, tal como la de vapor, la velocidad está sujeta á sufrir variaciones que pueden depender, ya de la misma fuerza motriz, es decir, del vapor que sale del generador con mayor ó menor abundancia y está dotado de una presion más ó ménos considerable, ó ya del uso que se haga de la fuerza en la fábrica en que se halla establecida la máquina. Compréndese que se tenga interés en que estas variaciones no pasen de ciertos límites, lo cual se consigue de varios modos, y en primer lugar, por el uso de los volantes que aumentan la masa de las partes movibles de la máquina. Cuando hay exceso de velocidad, la masa del volante absorbe el exceso de trabajo motor en forma de fuerza viva, que restituye, cuando se aminora el movimiento, á las diversas partes de la máquina. Dáse á la vez al volante un gran peso y un gran diámetro, y la mayor parte de su masa está repartida en el anillo que forma su circunferencia.

Las dimensiones y los pesos de los volantes se calculan teniendo en cuenta la potencia de la máquina y la mayor ó menor irregularidad del trabajo motor y del trabajo resistente.

El uso de un volante para regularizar el movimiento de una máquina de vapor no llena su objeto sino en tanto que la velocidad es, ó superior ó inferior á la velocidad normal. Pero si hubiese motivo para creer que esta velocidad fuese siempre excesiva ó siempre corta, el volante no podria evitar este inconveniente, porque á su vez adquiriria una velocidad demasiado grande ó sobrado pequeña, y este exceso podria ir aumentando, en el primer caso, hasta ocasionar la rotura. La fuerza centrífuga, que crece con el cuadrado de la velocidad, seria la causa de este percance que requiere el uso de un regulador de otro género.

Me refiero al *regulador de fuerza centrífuga*, con cuya ayuda la máquina regula por sí misma su velocidad cuando el vapor afluye de la cal-

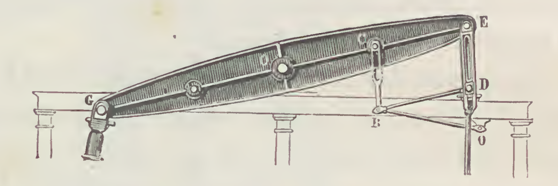


Fig. 242.—Paralelogramo articulado de Watt

dera con superabundancia ó exceso de presion, ó cuando no llegando en cantidad suficiente, va más despacio el motor.

Este aparato se compone de dos bolas metálicas B B, sostenidas por dos vástagos O A, O A', articulados alrededor del punto fijo O perteneciente á un eje vertical. Otros dos vástagos, articulados en A y A', se unen con un cilindro ó manguito M, que rodea el eje vertical y sube ó baja á lo largo de este eje. Además, todo el sistema recibe por medio de una polea P un movimiento de rotacion trasmitido por el árbol motor de la máquina. Por último, el cubo M está cogido por una horquilla ó grapa que forma el extremo de uno de los brazos de la palanca I L.

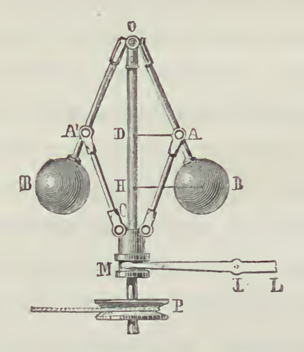


Fig. 243.—Regulador de Watt, de fuerza centrífuga

Cuando la máquina funciona con su velocidad reglamentaria, la palanca M I L permanece horizontal. Si aquella aumenta, la fuerza centrífuga separa las esferas del eje, el cubo sube y con él el brazo de la palanca I M: el otro brazo I L baja girando sobre el punto I. Si por el contrario la rapidez disminuye, la fuerza centrífuga disminuye tambien, y las esferas se acercan al eje, haciendo que el cubo baje y que la palanca se mueva de diferente modo que ántes.

Esta palanca está en comunicacion con una válvula del tubo por donde llega el vapor de la caldera, y de tal suerte que la válvula se cierra progresivamente en el primer caso, ó se abre más en el segundo. Por consiguiente, cuando la velocidad de la máquina excede del límite normal, llega el vapor en menor cantidad, y por el contrario, penetra con mayor abundancia cuando se retarda el movimiento.

Hay otros dos sistemas de reguladores (Farcot y Flaud) cuya disposicion difiere algun tanto de la del *regulador de fuerza centrífuga* (que tambien se conoce con el nombre de *moderador de Watt* ó de *péndulo cónico);* ambos están asimismo fundados en la accion de la fuerza centrífuga aplicada á masas que giran con un eje puesto en movimiento por la máquina. Pero el péndulo cónico tiene un inconveniente de que se hallan exentos los reguladores Farcot y Flaud, y es que regula, con la velocidad de régimen, la potencia de la máquina, al paso que estos permiten hacer variar esta potencia, sin que la velocidad de régimen varie mucho, lo cual es á veces muy útil en ciertas industrias.

CAPITULO IX

VARIOS TIPOS DE MÁQUINAS DE VAPOR

I

MAQUINA DE BALANCIN DE WATT

Volvamos ahora á nuestra máquina, al mecanismo de trasmision, y hagamos ver cómo se utiliza el movimiento del balancin ó del árbol motor para que funcionen la caja de distribucion y las bombas de alimentacion y de agotamiento.

En el árbol motor de la máquina va ajustada una *excéntrica*, que se ve en *d d* en la figura 244 y cuya funcion consiste en producir el movimiento alternativo de la caja de distribucion. Hé aquí, en cuatro palabras, cómo se obtiene este resultado. La excéntrica se compone de una pieza circular metálica atravesada por el árbol en un punto que no es su centro. Su movimiento de rotacion ocasiona el de una brida que lleva un largo triángulo metálico. Pero el extremo de este va adherido á uno de los brazos de una palanca acodada, cuyo segundo brazo sostiene la espiga de la caja de distribucion. El movimiento de oscilacion de la palanca producido por la rotacion de la excéntrica, da lugar á un movimiento alternativo vertical de la espiga, y la caja de distribucion funciona como anteriormente dijimos.

La figura 244 representa la máquina de vapor de balancin tal como salió de las manos de Watt, con todos los perfeccionamientos que este ilustre mecánico ha introducido en ella sucesivamente; dicho grabado permitirá que el lector se haga cargo de los diferentes mecanismos que hemos descrito en detalle y separadamente, así de distribucion como de trasmision. Asimismo nos servirá para ver cómo funcionan las distintas bombas de que hemos tratado al ocuparnos de la máquina.

H es el condensador que se introduce en un depósito de agua fria, R R, y que recibe el agua de este depósito por un tubo *t*. Como la condensacion del vapor no puede efectuarse sin que este ceda al agua el calor que lo mantiene en estado gaseiforme, el agua del condensador se calienta constantemente, por lo cual es necesario reemplazarla constantemente tambien, por nueva agua fria. De aquí se sigue la necesidad de que haya una bomba de agotamiento E, movida por el vástago E A unido al balancin; esta bomba repele el agua caliente extraida á un recipiente R', donde actúa á su vez la bomba de alimentacion W para aspirar el agua é introducirla en la caldera. Y es el vástago de esta bomba que recibe su movimiento del balancin.

Finalmente, en X X se ve el vástago de la bomba U, que sirve para alimentar de agua fria el depósito R R. Esta bomba, que suele ser de mayor fuerza que las dos anteriores, saca el agua de alimentacion de un manantial vecino, sea fuente, pozo ó rio.

Esta complicacion de órganos, de aparatos accesorios, todos los cuales toman su movimiento de la máquina de vapor, no existe sino en las máquinas de condensacion, es decir, de baja ó media presion. En las de alta presion, fijas ó movibles, se suprimen el condensador,

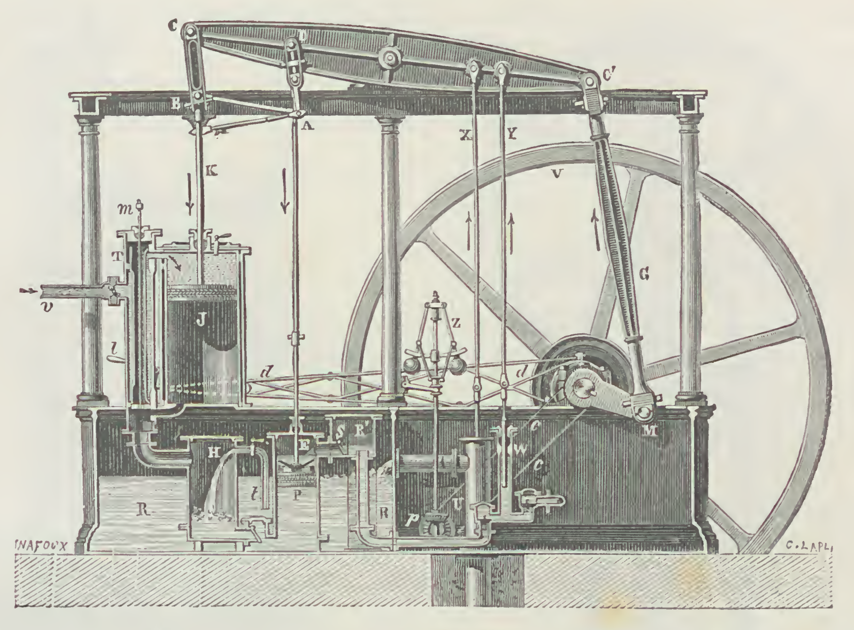


Fig. 244. — Máquina de balancin de Watt. — *v*, tubo de entrada del vapor; T, distribuidor; J, cilindro; H, condensador; P E, bomba de agotamiento; W Y, bomba de alimentacion de la caldera; U X, bomba de alimentacion del depósito R; *p l*, regulador; *d d*, excéntrica; A B C D, paralelógramo; G M, biela y manivela; V, volante

las bombas de agotamiento y todos los mecanismos á ellos inherentes, no quedando más que la bomba de alimentacion; pero precisamente hemos tomado por modelo la máquina de vapor más complicada, á fin de no olvidar ninguna cosa esencial para la explicacion de los mecanismos empleados en los diferentes tipos.

II

MÁQUINAS DE VAPOR DE TRASMISION DIRECTA.

La trasmision del movimiento en las máquinas de balancin se efectúa indirectamente, puesto que el del émbolo es circular alternativo ántes de hacerse contínuo.

Se han ideado muchos medios de trasmitir directamente el movimiento del émbolo al árbol; siendo sus resultados las máquinas *verticales*, *horizontales* y *oscilantes*. Daré una idea de cada una de estas máquinas.

La de *cilindro vertical*, que representa en sus dos caras la fig. 245, es una máquina de alta presion, en la cual el vapor actúa con expansion, pero sin condensacion.

En el título del grabado, se expresa cuáles son sus diferentes órganos, el cilindro, la caja de distribucion, el volante, el regulador ó péndulo cónico, etc. El único punto hácia el cual debemos llamar la atencion es el modo de trasmision de movimiento. El vástago del émbolo se articula directamente con la biela E F que obra sobre la manivela del árbol motor. Este vástago está guiado en su movimiento por una *resbaladera* ó *guía*, pieza horizontal móvil G G, que se mueve á lo largo de dos montantes verticales fijos en K y H, es decir, por una parte en el cilindro y por otra en el cuerpo de hierro de la máquina.

A decir verdad es un sistema de trasmision enteramente parecido al de la *máquina de cilindro horizontal* que representa la figura 246 y sobre el cual creemos innecesario añadir más para que se comprenda la disposicion de los órganos de esta máquina.

En las locomotoras veremos tan pronto empleados los cilindros horizontales como los inclinados: las razones que han aconsejado preferir tal ó cual de estas disposiciones, que no tienen nada de esencial, están en relacion, ya con la construccion y arreglo general de los órganos de la máquina, ó ya, por lo que hace á las máquinas fijas, con cuestiones de colocacion atendida su superficie, su altura, etc. En suma, esto no altera en nada el sistema de tras-

mision en sí mismo, que, en las máquinas descritas, consiste en la articulacion directa del vástago del émbolo con la biela del árbol motor.

No sucede lo mismo en las *máquinas de tronco*, en las que el vástago del émbolo se suprime y la biela está directamente articulada

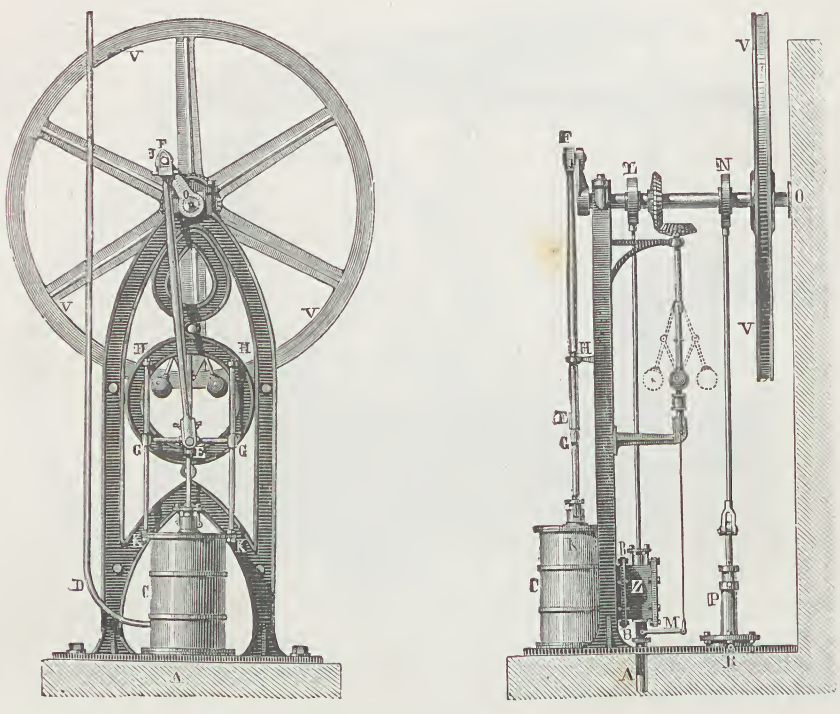


Fig. 245.— Máquina vertical de vapor. — A, tubo de entrada del vapor; C, cilindro; B, Z, caja de distribucion y cámara de vapor; K G H, guía; E, F, J, o, biela, manivela y árbol motor; V V, volante; N P R, bomba de alimentacion; D, tubo de salida

con el mismo émbolo. El movimiento oscilante de esta biela se verifica en un manguito ó vaina cilíndrica que atraviesa el cilindro y que está rodeada completamente por el émbolo. Esta disposicion disminuye la superficie del émbolo que recibe el empuje del vapor, habiendo que

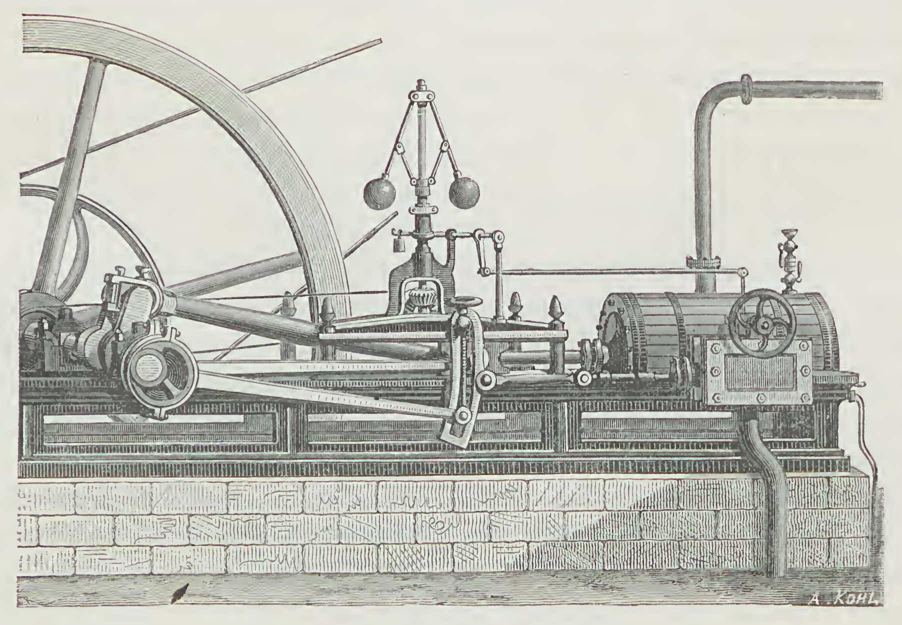


Fig. 246.—Máquina horizontal de vapor

compensar esta disminucion con un aumento del diámetro del cilindro. Fácil es de comprender el inconveniente de este sencillo mecanismo; por una parte el vapor se enfria más pronto, por cuanto la superficie de enfriamiento es mayor, y por otra los escapes son más fáciles, ya alrededor del manguito, ó bien por las ranuras que permiten el movimiento del émbolo.

Este sistema se halla principalmente en uso en las máquinas marinas inglesas.

Un constructor francés, M. Carré, ideó las máquinas de *cilindro oscilante* en que la trasmision se efectúa sin biela, estando el vástago del émbolo articulado directamente con la manivela del árbol motor.

El cilindro de las máquinas oscilantes está sostenido en muñones, como un cañon en su cureña; pero estos están huecos y sirven, el

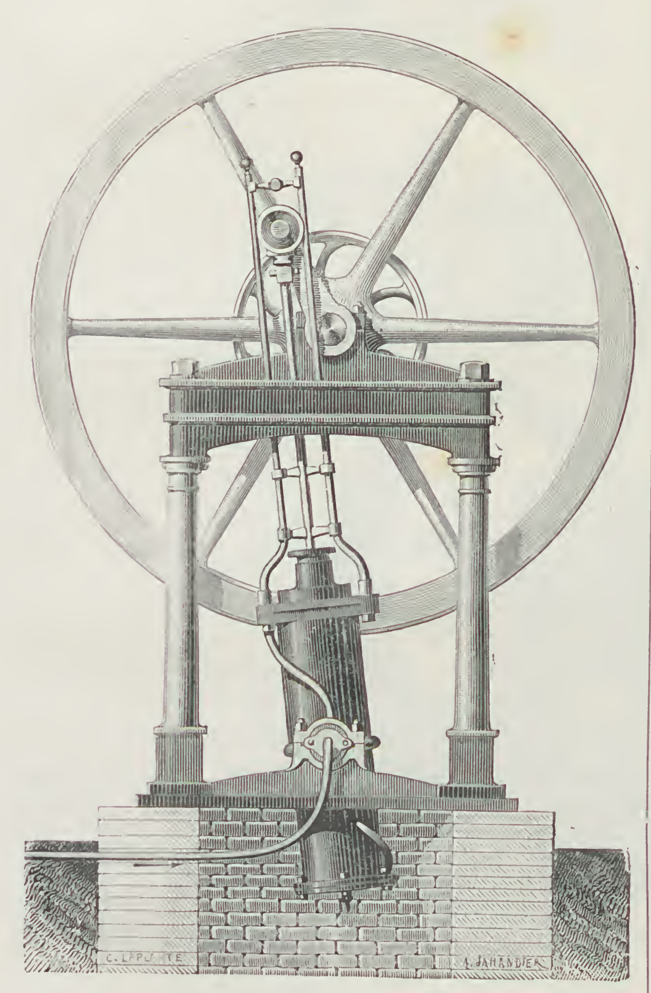


Fig. 247.—Máquina de vapor de cilindro oscilante

uno de orificio de admision del vapor y el otro de escape. Por lo demás, la distribucion se hace por una caja como en las máquinas ordinarias. Divídense las máquinas oscilantes en *horizontales* y *verticales*, segun la direccion media del cilindro en sus oscilaciones sucesivas.

Esta clase de máquinas está hoy casi abandonada por la industria excepto en la navegacion, pues en los pequeños buques de vapor se ven á menudo máquinas de dos cilindros oscilantes.

III

MAQUINAS DE VAPOR ROTATORIAS

Antes de estudiar las máquinas de vapor desde el punto de vista de sus tipos, réstame aún tratar de una especie de máquinas que se distingue de todas las que hemos revistado hasta ahora por el principio mismo de su mecanismo. Me refiero á las *máquinas de vapor rotatorias*, llamadas así porque la pieza sobre la que el vapor actúa directamente, la que corresponde al émbolo de las máquinas de cilindro, recibe un movimiento que es inmediatamente circular y contínuo. El problema de la transformacion del movimiento no existe pues en estas máquinas.

La idea de resolver la cuestion de los motores de vapor no es nueva. Ya se le habia ocurrido á Watt en 1782; pero los inconvenientes de este sistema no han permitido á la grande industria proseguir los ensayos iniciados en esta vía; y hoy mismo, á pesar de los perfeccionamientos introducidos en la construccion de las máquinas rotatorias, la industria no hace uso de ellas sino en muy contados casos.

Nos limitaremos á citar la *máquina rotatoria de disco* ideada por Bishop y construida por Rennie. Para comprender bien su mecanismo, que es muy ingenioso, pero de prolija descripcion, seria menester descender á minuciosos detalles, por lo cual solamente diremos que la ha adoptado la marina rusa para los cañoneros y pequeños vapores de hélice.

La máquina de vapor rotatoria del americano Behrens que funcionó en Paris en la Exposicion universal de 1867, es mucho más sencilla, á lo ménos en cuanto á su descripcion. La fig. 248 representa su aspecto exterior. Véase cómo funciona y cuál es la disposicion del mecanismo motor y de la distribucion.

En dos árboles paralelos C C (fig. 249) hay montadas dos piezas en forma de porciones de coronas, una y otra concéntricas al árbol correspondiente y fijas por uno de sus extremos en una dilatacion de este. Dichas piezas hacen las veces del émbolo de las máquinas comunes. Sus caras exteriores y convexas encajan en un cilindro A A perfectamente liso, y las inferiores y cóncavas se mueven alrededor de dos casquillos *c c'* concéntricos al árbol. La for-

ma de las diferentes piezas está calculada de suerte que cada uno de los émbolos, en su movimiento, se introduce en una muesca concéntrica á su árbol de rotacion, practicada en el casquillo fijo del otro émbolo. De esta disposicion resulta que el vapor no puede pasar jamás entre uno de los émbolos y el casquillo del otro.

Veamos ahora cómo funciona el vapor.

Llega por el tubo de admision B de la caldera y penetra en el espacio comprendido entre los dos émbolos y el casquillo *c*. Empuja, apoyándose en la cara convexa de E', la cara cóncava del émbolo E, y le hace girar así como á su árbol en el sentido marcado por la flecha. Como los dos árboles llevan exteriormente en-

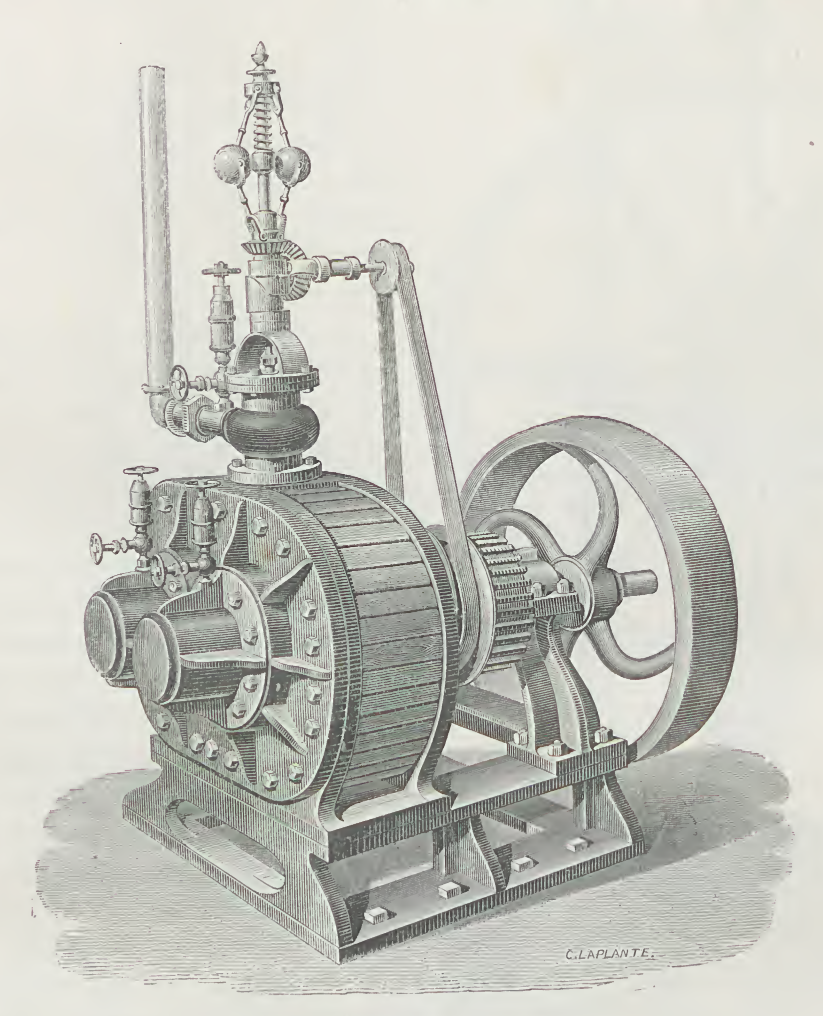


Fig. 248.—Máquina rotatoria de Behrens

granajes destinados á darles vuelta en sentido inverso y con igual velocidad, el árbol C' y su émbolo se mueven en direccion opuesta á la del primero.

Los grabados 2 y 3 de la figura 249 representan la disposicion de las piezas despues de un cuarto y de media revolucion. En este momento, el émbolo E tapa la abertura B, el vapor no puede actuar sobre él, pero empieza á pesar sobre el otro. Antes que empiece el tercer cuarto de la rotacion (fase 4), la abertura del registro de escape D queda destapada, el vapor del espacio *a* sale, el émbolo E continúa arrastrado en su movimiento por el otro árbol y por la velocidad adquirida y así sucesivamente. El vapor actúa pues sobre cada émbolo durante algo más de la mitad de una vuelta, y alternativamente cada uno de los árboles recibe su movimiento del vapor mismo y del otro árbol con el que engrana. Uno de los dos árboles es el motor de la máquina y va provisto de un volante. La máquina rotatoria de Behrens es, como se ve, una máquina de vapor sin expansion ni condensacion; pero es posible hacerla funcionar con aquella, por medio de una válvula convenientemente situada.

Una de las aplicaciones singulares de esta máquina consiste en emplearla como motor de

una bomba construida con arreglo al mismo principio y que funciona del mismo modo. En los Estados-Unidos se usa en las cervecerías y refinerías, como bomba elevadora de líquidos, agua, cerveza, melazas, etc. En Europa no se emplea tanto, pero parece cierto que esta máquina tiene verdadero valor industrial.

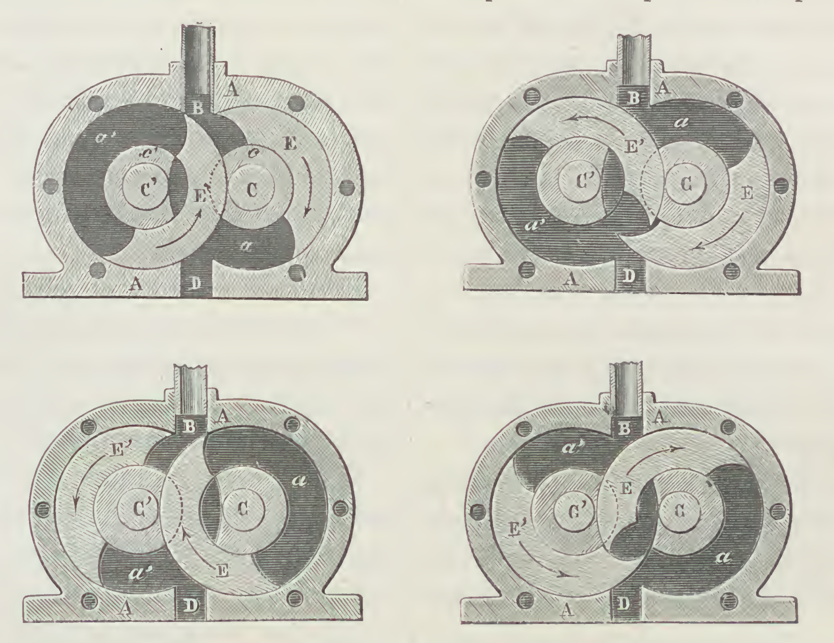


Fig. 249.—Máquina rotatoria: fases de un movimiento completo de rotacion

IV

POTENCIA DE LAS MAQUINAS DE VAPOR

Tal es la máquina de vapor en su conjunto y en los detalles principales de su organismo.

Resumiendo en breves líneas la descripcion que ha servido de asunto para los tres ó cuatro capítulos anteriores, vése que la máquina de vapor consiste:

1.º En una caldera ó *generador de vapor* que trasforma en fuerza elástica disponible la potencia contenida en un combustible, como por ejemplo la hulla. El calor es el agente de esta trasformacion: pasa del hogar á las paredes que constituyen la *superficie de calefaccion* de la caldera, y comunicándose del metal al agua, eleva la temperatura de esta, suscita y mantiene la ebullicion, suministrando sin cesar al depósito de vapor la masa gaseosa y elástica á una presion que está en razon del trabajo que se haya de efectuar. Hogar, parrilla, cenicero, conductos de humo y chimenea, hervidores y cuerpo de la caldera, válvulas y avisadores de seguridad, manómetros, indicadores de nivel y de presion, todo esto constituye el generador de la máquina con sus accesorios.

2.º Una vez formado el vapor, la máquina propiamente dicha se compone de órganos del movimiento, del receptor de la fuerza y de los aparatos de distribucion que tienen por objeto originar un movimiento alternativo rectilíneo. El cilindro, la caja de vapor, la de distribucion ó repartidor y el condensador son los principales órganos de esta parte de la máquina. Tal es el *mecanismo motor*.

3.º y último. Producido el movimiento en su forma inmediata, se le ha de trasformar, hacerle apto para el trabajo que la industria exige, lo cual es por lo comun en forma de movimiento circular contínuo. Las bielas, manivelas, balancines y guías son los órganos empleados con más frecuencia en esta parte de la máquina á la cual hemos reservado el nombre de *mecanismo de trasmision*. El volante y los reguladores tienen un objeto particular, el de mantener en los límites regulares la velocidad de régimen ó la fuerza del motor.

Comprendidas bien estas funciones, así como los aparatos que las desempeñan, á lo ménos en sus disposiciones particulares, es fácil ya entrar en el exámen de los diferentes tipos de máquinas que se han ideado desde el orígen ó invencion del vapor, y la mayor parte de las cuales se usan hoy en la industria manufacturera, en las vías férreas, en la navegacion, y por último, en la agricultura

Pero ántes de seguir pasando esta revista de tipos, ántes de presentar el vapor funcionando en los servicios múltiples que presta á la civilizacion, permítaseme, no una digresion, puesto que se trata de una cosa esencial, sino una breve explicacion de algunas voces y locuciones usadas con frecuencia cuando se habla de las máquinas y se valúa su potencia.

He dicho ya lo que se entiende por máquina de *baja, media y alta presion.* Precisémoslo más.

Una máquina de baja presion es aquella en que el vapor tiene una tension que no pasa de *atmósfera y media.* Esta máquina va siempre acompañada de un condensador.

Cuando la caldera da vapor á una tension comprendida entre *tres y cinco atmósferas,* la máquina es de media presion, y aunque lleva á menudo un condensador, no es absolutamente necesario.

Finalmente, cuando la tension del vapor excede de *cinco atmósferas,* en cuyo caso la máquina funciona generalmente sin condensador, se trata de una máquina de *alta presion.*

Pero la potencia de una máquina no depende solamente de la fuerza elástica del vapor que sirve para moverla. Este no es más que un elemento; hay que tener en cuenta, partiendo de este elemento, las dimensiones del cilindro, el número de golpes del émbolo que la máquina da por minuto ó por hora, número que á su vez depende de la cantidad de vapor regularmente suministrada por la caldera. De este modo se llega á valuar el trabajo del vapor sobre el émbolo; pero al trasmitirse este trabajo al árbol motor y al volante, es en parte absorbido por los rozamientos y resistencias de los órganos de trasmision, de suerte que se le debe reducir con arreglo á los datos de la experiencia para sacar en consecuencia el trabajo real, la potencia efectiva de la máquina.

Este trabajo se valúa en *caballos de vapor,* y se dice de una máquina que es de 3, 4, 10, 50, 500 caballos.

Antes de proseguir, digamos, pues, claramente qué significa la expresion: *caballo de vapor.*

Un esfuerzo ejercido se calcula en kilógramos, lo que equivale á decir que se asimila el efecto de una fuerza al de un peso, por ejemplo, al efecto que un número dado de kilógramos produce en un muelle. Pero esto no basta para medir el trabajo efectuado por un motor cualquiera, pues este trabajo depende tambien del tiempo necesario para llevarlo á cabo, el cual depende á su vez de la velocidad del movimiento producido. Para acabar de definirlo hay que decir qué camino hace recorrer el motor al peso durante la unidad de tiempo, durante un segundo.

Fundado en este principio, dáse el nombre de *kilográmetro* al trabajo capaz de elevar un kilógramo á un metro de altura en un segundo. Tal es la unidad de trabajo adoptada generalmente por los mecánicos.

Sólo que, en la práctica, y cuando se trata del trabajo de las máquinas, se emplea otra unidad que es 75 veces mayor que la primera, que equivale por consiguiente á 75 kilográmetros, y á la cual ha aplicado el uso la denominacion de *caballo de vapor.*

Hé aquí con qué motivo se adoptó tal costumbre:

Cuando Watt introdujo en las primeras máquinas de vapor los perfeccionamientos en virtud de los cuales las adoptaron en las minas y en la industria inglesa, los constructores de dichas máquinas se vieron en la precision de garantizar á los que les hacian pedidos la fuerza de los nuevos artefactos. En las minas se empleaban por lo comun caballos para los trabajos de las mismas: el promedio del trabajo de estos animales se tomó por término de comparacion, y la cantidad resultante, calculada experimentalmente por Watt, el *horse-power,* sirvió para valuar la potencia de las máquinas construidas. Fijóse en una cifra que traducida en medidas métricas, correspondia á 74 ó 76 kilógramos elevados á un metro de altura, y el promedio ó sea 75 kilográmetros se ha adoptado hoy universalmente. Pero no hay que confundirse. Se supone que el trabajo del vapor es continuo y que las máquinas trabajan dia y noche sin parar. Así pues, una máquina de la fuerza de un caballo hace en un dia, es decir, en 86,400 segundos, un trabajo equivalente á 86,400 × 75 ó á 6.480,000 kilográmetros. Un caballo de carne y hueso necesita, por el contrario, descansar; y haciéndole trabajar 8 horas diarias no desarrollaria sino un traba-

jo tres veces inferior al de la misma máquina.

Pero en realidad, es un cálculo demasiado elevado. Las cifras de Watt, á juzgar por los experimentos hechos posteriormente, estaban basadas en el trabajo de caballos de vigor más que regular y á los que probablemente habrian reventado. De los experimentos á que nos acabamos de referir resulta que un caballo de fuerza regular, uncido á un malacate y yendo al paso, desarrolla una fuerza igual á 40 kilográmetros y medio, lo que da, en un trabajo de ocho horas, 1.166,400 kilográmetros.

Vése, pues, por la comparacion de dos cifras relativas al trabajo de la máquina y al del animal, que en realidad, para reemplazar una máquina cuya fuerza sea de un *caballo de vapor*, seria preciso emplear en dar vueltas á un malacate que produjese el mismo trabajo y sin parar, algo más de *cinco caballos y medio.*

Lo que constituye su fuerza, es la cantidad ó peso de vapor que es capaz de producir en una hora, cuando está en pleno trabajo. Esta cantidad depende especialmente de la superficie de calefaccion, de suerte que, en igualdad de circunstancias, el generador que presenta al hogar y á los gases de la combustion la mayor extension de superficie de caldeo, es el que engendra mayor fuerza.

En cuanto al consumo de carbon, está sin duda alguna en relacion con la expresada superficie; pero varía de una máquina á otra segun el tipo de estas, segun que sea de alta, media ó baja presion y segun que funcione con ó sin condensador, con ó sin expansion. Hé aquí acerca de esto algunos datos, producto de la experiencia.

La práctica ha hecho reconocer que es preciso contar por cada caballo de vapor una superficie de calefaccion que varía entre un metro y un metro y medio cuadrado. Una máquina de vapor de la fuerza de 10 caballos debe pues tener un generador cuya superficie de calefaccion varíe entre 10 y 15 metros cuadrados. El promedio de la cantidad de vapor producida por hora es entónces de 20 kilógramos por caballo, de suerte que la caldera de una máquina de 10 caballos debe poder vaporizar 200 kilógramos por hora, ó sea 200 litros de agua próximamente.

Por lo que hace al consumo de hulla por hora y por caballo, varía con las máquinas, segun hemos dicho. Las de Watt, de baja presion, consumen de 5 á 6 kilógramos de hulla; las de Woolff, 3 kilógramos; las máquinas de alta presion, con expansion y sin condensador, de 4 á 5 kilógramos por caballo de fuerza y por hora. Estas son las ménos económicas, pero compensan este defecto con la ventaja que más adelante indicaremos.

Añadamos ahora una palabra sobre la fuerza de una máquina en su relacion con las dimensiones del cilindro y con la rapidez del émbolo, ó lo que es lo mismo, con el número de movimientos de este por minuto ó por hora.

Conocida la presion del vapor por las indicaciones del manómetro, ¿cómo se calculará el trabajo que efectúa el émbolo en su marcha por el cilindro? Presentemos un ejemplo que hará comprender la pregunta así como la respuesta que deba dársele.

Supongamos una presion de 4 atmósferas en una máquina de condensacion, ó de 5 atmósferas en otra sin condensador. El esfuerzo ejercido por el vapor sobre el émbolo será en realidad el mismo en ambos casos, puesto que en el segundo la presion atmosférica se ejerce sobre la cara del émbolo opuesta á aquella que la fuerza elástica del flúido empuja. Así pues, el esfuerzo del vapor será de 1,033 kilógramos multiplicados por 4 en cada centímetro cuadrado de la superficie, y este resultado será menester repetirlo tantas veces cuantos sean los centímetros cuadrados que mida la superficie del émbolo.

Pero esto no nos da el trabajo mecánico que será tanto mayor cuanto más largo sea el cilindro ó más grande la marcha del émbolo. Para tener este trabajo en kilográmetros, hay que multiplicar además el resultado precedente por dicha longitud, de suerte que se puede dar la regla siguiente:

Multiplíquese la superficie del émbolo por su marcha expresada en metros, por la presion efectiva del vapor y por 1,033, y se tendrá el número de kilográmetros que representa el trabajo efectuado por el émbolo en su marcha. Pero la superficie multiplicada por la longitud del cilindro, es el volúmen de este.

Así pues, el trabajo es proporcional á la presion del vapor y al volúmen del cilindro. Su-

pongamos, en el caso que tomamos por ejemplo, que el diámetro del cilindro es igual á 40 centímetros, y su longitud igual á 60 centímetros; el trabajo de una marcha del émbolo será: $\pi\ 20^2 \times 40 \times 1033 \times 4$, ó $207^{kgm},40$. Como un golpe de émbolo se compone de dos movimientos, cada uno de estos equivaldrá á 415 kilográmetros.

Esto no representa el trabajo de la máquina sino para un vaiven del émbolo, de suerte que es preciso conocer el número de sus movimientos por minuto ó por hora para valuar definitivamente la fuerza de la máquina en caballos de vapor.

La velocidad del émbolo es muy variable, pero casi no pasa de 60 golpes por minuto, ó sea uno por segundo. Si consideramos esta velocidad máxima, la fuerza de la máquina será precisamente de 415 kilográmetros por segundo, esto es, 5,53 ó un poco más de cinco caballos y medio. Supongamos 44 golpes de émbolo por minuto; esto hará un total de 18,278 kilográmetros, es decir, 304 kilográmetros por segundo, ó casi exactamente una fuerza de 4 caballos de vapor.

V

OJEADA HISTÓRICA SOBRE LA MAQUINA DE VAPOR

Las primeras máquinas de vapor realmente aplicadas á la industria fueron las de Savery (1696-1698). Papin habia dado su principio, puesto que como dice Arago: «Papin es el primero que ha pensado en combinar en una misma máquina de fuego, la accion de la fuerza elástica del vapor con la propiedad que tiene este vapor, y que Papin indicó, de condensarse por enfriamiento.» El dibujo de la máquina elevadora de Savery, que reproduce la figura 250 en sus disposiciones esenciales, muestra que este ingeniero producia el vapor en un depósito separado B (que equivale á la caldera). El flúido llenaba primero el recipiente S y el tubo A, del que expelia el aire. Cerrando entonces la llave C, y abriendo la *e* de un depósito E lleno de agua fria, producia la condensacion del vapor del recipiente S; hacíase el vacío, y el agua del depósito R subia y llenaba en parte el recipiente y el tubo. Un chorro de vapor que salia entónces de la caldera y comprimia la superficie del líquido, le obligaba á elevarse á una altura que dependia de la presion. Luégo sobrevenia una nueva condensacion, una nueva accion del vapor, y así indefinidamente.

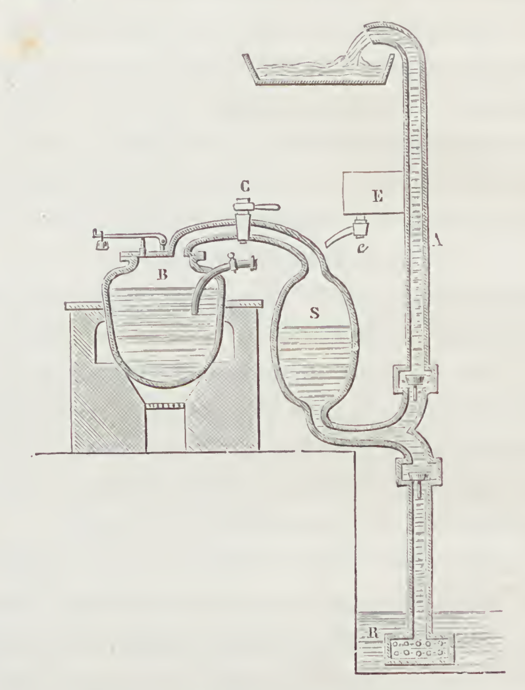


Fig. 250.—Máquina de vapor de Savery

«Para elevar el agua á la pequeña altura de 65 metros (200 piés), Savery se veia obligado, dice Arago, á elevar el vapor de su caldera á seis atmósferas, resultando de aquí contínuos desarreglos en las junturas, el derretimiento de los másticos y hasta explosiones peligrosas. Así fué que, á pesar del título de su obra *El amigo del minero (Miner's Friend)*, las máquinas de este ingeniero no fueron de gran utilidad en las minas, ni se usaron más que para distribuir el agua en las dependencias de los palacios ó casas de recreo, en los parques ó jardines, y en una palabra, donde quiera que la diferencia de nivel que debia salvarse no pasaba de unos cuarenta piés.»

Como se ve, la máquina de Savery utilizaba la fuerza elástica del vapor para repeler el agua directamente, y la condensacion de este vapor para producir el vacío y la elevacion del agua bajo la accion de la presion atmosférica. Era una especie de bomba aspirante é impelente en que la accion del vapor hacia las veces de la fuerza muscular aplicada al juego del émbolo en el cilindro de estos aparatos hidráulicos. No es comparable con la máquina de vapor moderna, tal cual hoy la conocemos.

Catorce ó quince años despues de la primera tentativa de Papin, el ingeniero inglés Savery se asoció con dos compatriotas suyos, Tomás Newcomen y Juan Cawley, habitantes ambos en la ciudad de Darmouth, en el Devonshire, donde ejercian, el primero el oficio de herrero ó quinquillero, y el segundo el de vidriero. De esta asociacion nació la máquina de vapor conocida con el nombre de máquina de Newcomen ó de *máquina atmosférica.*

Digamos en pocas palabras cómo funciona el vapor en esta máquina.

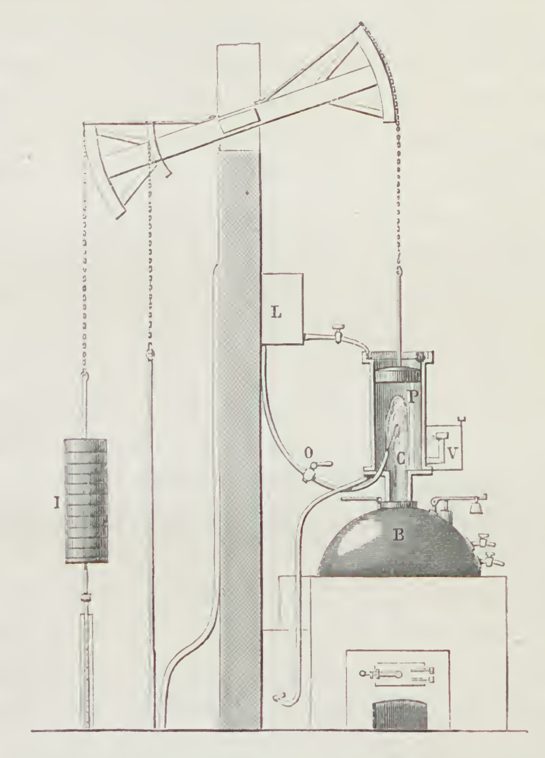


Fig. 251.—Máquina de vapor atmosférica de Newcomen

La caldera produce vapor á una presion un poco superior á la atmosférica. En el momento de ponerse en marcha, el émbolo está en la parte superior del cilindro, el vapor penetra en este y expulsa el aire por el orificio V, al que se da el nombre de *reniflard* (sorbedor). Entónces se abre la llave ó grifo del tubo L O, y el agua fria, inyectada en el cilindro, condensa el vapor; cuando se cierra la llave, la presion exterior actúa sobre el émbolo y le hace bajar al fondo del cilindro.

En este momento, un distribuidor destapa la comunicacion del cilindro con la caldera, de suerte que el vapor por debajo y la presion atmosférica por encima del émbolo, se equilibran. El émbolo quedaria en esta situacion, si un contrapeso I, unido al balancin de la máquina, no le obligara á subir á la parte superior del cilindro. Una nueva condensacion le hace bajar otra vez y así sucesivamente, con lo cual se consigue el movimiento de vaiven.

Compréndese ahora la razon de la denominacion de máquina *atmosférica* dada á la de Newcomen; la presion del aire exterior es su motor, y el vapor no interviene sino para equilibrarla durante la ascension del émbolo. Miéntras este baja, la condensacion del vapor produce el vacío, y entónces la presion del aire hace tambien que baje el émbolo.

Las máquinas atmosféricas se utilizaban principalmente para extraer el agua de las minas, y posteriormente se usaron para distribuir las aguas en la ciudad de Lóndres. A pesar de los grandes perfeccionamientos introducidos por espacio de siglo y medio en los motores cuyo agente es el vapor, parece que las máquinas de Newcomen se empleaban hace poco tiempo y quizás se empleen hoy todavía en los sitios en que el carbon de piedra es barato.

Salvo algunas modificaciones de detalle, la máquina de vapor continuó siendo hasta 1769 tal como la habian hecho Newcomen, Savery y Cawley. De este modo trascurrieron sesenta y cuatro años, infructuosamente por decirlo así, hasta que el genio de Watt, secundado por los rápidos progresos de las ciencias físicas, la convirtió en el poderoso motor, en el incomparable ingenio cuya descripcion hemos hecho, escogiendo precisamente por tipo la máquina de balancin que aún hoy lleva el nombre de Watt.

VI

WATT Y LA MÁQUINA DE VAPOR

Acabamos de ver que las máquinas de Newcomen eran simples bombas, aparatos á la verdad excelentes para extraer el agua de las minas, pero no verdaderos motores universales, capaces de satisfacer las necesidades de una fábrica con un movimiento regular y constante. La razon es muy sencilla. La presion de la atmósfera que produce el movimiento descendente del émbolo es la verdadera fuerza motriz de estas máquinas, que no tienen ninguna potencia efectiva durante la marcha ascendente; era cuanto se necesitaba para el juego de las bombas que hacian mover; pero hubiera sido un

grande inconveniente para una máquina motora que no debe tener ninguna intermitencia de accion.

Las máquinas atmosféricas eran, pues, máquinas de *simple efecto*. Watt las trasformó primeramente en máquinas de *doble efecto*. Suprimió la accion de la atmósfera, sustituyéndola en las dos fases del movimiento por la del vapor. El cilindro, abierto por arriba, fué reemplazado por el cilindro cerrado en sus dos extremos, dividido por el émbolo en dos capacidades distintas en que el vapor penetra alternativamente, y en que se condensa alternativamente tambien.



Fig. 252.—Jaime Watt

Así fué creada la verdadera máquina de vapor, aquella en que el flúido elástico es el verdadero motor, causa única del movimiento. Las oscilaciones del émbolo comunican entónces al balancin oscilaciones de fuerza y de amplitud iguales. En una palabra, con el doble efecto la máquina de vapor se convirtió en motor universal, aplicable á todas las industrias.

Por otra parte, al generalizar Watt el uso de la máquina de vapor, abria por esto mismo la puerta á los perfeccionamientos. Él mismo consagró todas sus fuerzas, toda su inteligencia á esta tarea tan árdua en un principio. Merced á la invencion del *gobernador* (nombre inglés, *governor*, del regulador de fuerza centrífuga), redujo todavía más las desigualdades del movimiento.

«La eficacia del regulador es tal, dice Arago, en su Noticia biográfica de Watt, que hace pocos años se veia en Manchester, en la fábrica de hilados de algodon de M. Lee, industrial de gran talento, un reloj puesto en movimiento por la máquina de vapor de la fábrica, sin que en su marcha discrepase casi nada de la de otro reloj de muelle que habia á su lado. El secreto, el verdadero secreto del asombroso perfeccionamiento de los productos industriales de nuestra época está en el regulador de Watt y en el uso bien entendido de los volantes; esto es lo que dá á la máquina de vapor una marcha enteramente libre de sacudidas; por esto puede, con el mismo éxito, bordar muselinas y forjar áncoras, tejer las telas más delicadas y comunicar un movimiento rápido á las pesadas muelas de un molino de harina. Esto explica tambien porqué dijo Watt, sin temer que le tacharan de exagerado, «que para evitar las idas y venidas de los criados, se haria llevar las tisanas en caso de enfermedad por aparatos dependientes de la máquina de vapor.»

La invencion del condensador separado de las bombas que le acompañan fué de una importancia capital, principalmente desde el punto de vista de la economía. A igualdad de efecto, redujo á la cuarta parte el gasto de combustible de las máquinas de Newcomen. Fácil es formarse una idea del ahorro realizado desde un principo en los países mineros en que funcionaban las máquinas de agotamiento, y despues en todas las fábricas en que se usa el vapor á baja y media presion, por el hecho siguiente, citado con frecuencia por los historiadores del vapor. Funcionaban tres bombas en las minas de Chace-Watter cuyos propietarios pagaban á Watt y á su socio Bolton una especie de censo por el derecho de servirse del condensador. Habíase fijado la cantidad que este censo representaba en la tercera parte del carbon de piedra economizado. Pues bien, los propietarios de la mina creyeron más ventajoso redimir este derecho mediante el pago anual de 60,000 francos. Así pues, el aditamento de un condensador de Watt producia anualmente

en cada máquina una economía de combustible que excedia de 60,000 francos, más de 180,000 en las tres máquinas de la mina en cuestion.

El uso de la expansion que Watt habia indicado, pero que no se ha adoptado en grande escala hasta que Woolff inventó las máquinas de dos cilindros, ha aumentado todavía la economía de vapor y por consiguiente la de combustible, ese *desideratum* de cuantos se afanan en perfeccionar la máquina de vapor. En su orígen sólo se conocia la expansion fija; pero es posible variarla gracias á nuevos mecanismos.

Para ser justos, no debemos limitarnos á citar el nombre de Watt al reseñar la historia de los perfeccionamientos de la máquina de vapor. Keane Fitzgerald fué el primero que se sirvió en 1758 del volante para regularizar el movimiento de rotacion; Washbrough introdujo en 1778 el uso de las bielas para trasformar el movimiento de rotacion en el rectilíneo y oscilatorio del vástago del émbolo, y por fin Murray inventó en 1801 la caja de distribucion movida por una excéntrica. Por lo demás, al describir las máquinas de vapor marinas, las locomotoras y locomóviles, completarémos en lo posible esta corta historia de los progresos del vapor.

CAPITULO X

LA NAVEGACION POR VAPOR

I

LAS MÁQUINAS MARINAS

Ciento dos años trascurren entre Newcomen y Fulton, esto es, entre la primera aplicacion verdaderamente industrial de la máquina de vapor y la instalacion definitiva del poderoso ingenio á bordo de un barco al que sirve de motor.

Y sin embargo, no habia sido por falta de combinaciones ni de tentativas.

Tambien hemos de remontarnos hasta Papin para encontar claramente formulada la idea madre de esta aplicacion, que tan considerable desarrollo debia adquirir un siglo despues. En 1695, Papin indica la posibilidad de aplicar la fuerza de vapor «á remar contra el viento,» hace observar «cuán preferible seria esta fuerza á la de los galeotes para ir de prisa por el mar;» se le ocurre sustituir los remos ordinarios «por remos giratorios»; y se ingenia para dar con un mecanismo que le permita obtener el movimiento continuo de rotacion.

Más aún; parece que en 1707 Papin puso en ejecucion este pensamiento, este proyecto simplemente indicado en un principio, y que hizo construir é instalar en un barco una máquina de vapor destinada á ponerlo en movimiento. Segun parece, embarcóse en Cassel, en el rio Fulda, y al llegar á Munden (Hanover) se proponia seguir adelante por el Weser hasta la Gran Bretaña, cuando los barqueros de este rio, amotinados contra el grande hombre que en su concepto, amenazaba dar al traste con su industria, hicieron pedazos el barco y la máquina.

En 1737 el inglés J. Hull proponia cambiar los remos por dos ruedas de paletas puestas á la popa de los barcos, y hacer girar su eje comun con una máquina de Newcomen. Este proyecto no llegó á su ejecucion.

La primera prueba de navegacion por vapor despues de la de Papin, tuvo lugar en Paris, en el Sena, frente por frente del campo de Marte. El buque habia sido construido por el conde de Auxiron. Un año despues, en 1775, un sabio que llegó á ser miembro de la Academia de ciencias, Perier, hizo análogos experimentos, pero sin mejor éxito.

Hasta fines del siglo repitiéronse estos, siendo cada vez más felices. En 1778, el marqués de Jouffroy hizo la prueba de un barco de vapor en Baume-les-Dames, en el rio Doubs, y tres años despues, en Lyon, en el rio Saona. En esta última tentativa sobre la que se emitió un dictámen muy favorable, tratábase de un barco de 46 metros de largo por cuatro y medio de ancho; una máquina de vapor atmos-

férica ponia primero en movimiento dos especies de postigos que se abrian y cerraban alternativamente, y que fueron en seguida reemplazados por dos ruedas de paletas. El nombre de Jouffroy merece, pues, acompañar al de Fulton en la realizacion práctica de la navegacion por vapor.

Debemos citar tambien entre los que han contribuido á realizar la invencion y la idea de Papin, á Patrick Miller, que publicó en Edimburgo en 1787 una obra sobre la sustitucion de los remos por las ruedas de paletas y sobre la posibilidad de emplear la máquina de vapor para darles movimiento. Miller hizo más adelante la prueba de un barco doble provisto de una rueda en su centro y, segun se dice, le hizo navegar por los lagos de Suiza en 1789.

El abate Darnal en Francia (1781), los americanos Rumsay y Fish (1786-88), los ingleses lord Stanhope (1795), Baldwin (1796), Livingstone (1798), Desblancs, Smington, Stevins y Oliverio Evans hicieron asimismo tentativas de navegacion por vapor que se multiplicaron cada vez más en Europa y América hasta la época en que el americano Fulton logró por fin un éxito completo.

Fulton habia estudiado en Francia en 1803 las condiciones prácticas del problema por resolver, y sido secundado en sus esfuerzos por su compatriota Livingstone, á la sazon embajador de los Estados Unidos. Un barco construido en el Sena habia dado por resultado la velocidad de $1^{m},60$ por segundo.

Fulton hizo al gobierno de Bonaparte proposiciones que no obtuvieron buena acogida, en vista de lo cual se decidió á regresar á América.

En seguida encargó á Watt y Bolton que le construyeran una máquina, que colocada en agosto de 1807 á bordo del buque *Clermont*, proporcionó por fin la solucion práctica y definitiva de la navegacion por vapor.

Verificóse el primer viaje de Nueva York á Albany, cuya distancia es de 60 leguas, en 32 horas, y luego en 30, estableciéndose poco despues un servicio regular entre las dos ciudades.

La navegacion por vapor habia pasado decididamente del estado de bosquejo al de hecho consumado, del período de los tanteos y de las pruebas al del buen éxito y del triunfo. De esto hace más de setenta y seis años.

Hoy media una considerable distancia entre el barco de Fulton y los grandes vapores trasatlánticos que viajan con regularidad entre el viejo y el nuevo mundo. Los progresos del arte nuevo son inmensos; pero no se debe olvidar la parte que corresponde á cada uno de los



Fig. 253.—Retrato y firma de Roberto Fulton

inventores que han trabajado sin desanimarse en este descubrimiento memorable, desde el modesto Papin hasta Jouffroy y Fulton.

II

LOS VAPORES DE RUEDAS

Mucho ántes de descubrirse el vapor habíase tenido la idea de sustituir los remos de los barcos por ruedas movidas por los animales ó por el hombre, y áun se habian hecho algunas pruebas al efecto. Los romanos y cartagineses se habian servido ya de barcos impelidos por ruedas de paletas. En algunas medallas antiguas

se ven representadas *libúrnicas* (naves empleadas por los romanos en Actium) con tres pares de ruedas de paletas en sus costados, movidas por tres yuntas de bueyes. El *Arte naval* dice que «de tiempo inmemorial se usan en China juncos de cuatro ruedas, cuyo motor es un ingenioso manubrio movido por hombres.» En 1472, Valturio de Rimini describia una rueda cuyo árbol lo movian hombres por medio de manubrios acodados, y cuyas paletas reemplazaban á los remos. Du Quet, de la Academia de ciencias de Paris, propuso en 1699 un propulsor por el estilo. Cuando algunos años ántes, Papin propuso aplicar el vapor á los barcos, hizo mencion de las ruedas de remos de la lancha del príncipe palatino Ruperto, que habia visto en 1678 en Inglaterra: ruedas que estaban movidas por caballos uncidos á un malacate.

Este sistema de propulsion no se debia adoptar formalmente hasta el descubrimiento y aplicacion de un motor poderoso, y acabamos de ver que este motor era el vapor. Así pues, desde el invento de Fulton, surcan los rios, los lagos y el mar barcos armados de ruedas de paletas.

Todo el mundo sabe lo que es una rueda de paletas; los que no han visto buques de vapor han podido observar ruedas análogas en los molinos de nuestros rios.

Las *paletas* que irradian al rededor del eje, al cual van sólidamente sujetas por medio de barras ó llantas de hierro, son tablones rectangulares que, puestos en movimiento por la rotacion del árbol motor, penetran uno tras otro en el agua, y apoyándose en la masa líquida, hacen avanzar el barco en direccion opuesta á la de su propio movimiento.

Las ruedas son siempre dos por exigirlo así la simetría y el equilibrio; están montadas en el mismo árbol ó eje que atraviesa el buque perpendicularmente á su longitud, y cuando se introducen en el agua verticalmente, el borde superior de las paletas debe estar cubierto por el líquido á una altura de 10 á 20 centímetros.

Sucede con el trabajo mecánico de las paletas lo que con el de los remos; no produce un efecto útil, es decir, no empuja el barco hácia adelante sino porque ocasiona un movimiento del agua hácia atras; este último movimiento, sin el cual no existiria el primero, que es su reaccion, se llama *retroceso;* absorbe una cantidad considerable del trabajo del vapor, aparte de las pérdidas ocasionadas por el rozamiento.

Como ejemplo de esta reparticion del trabajo motor, citaremos el que presenta M. Sonnet en su *Diccionario de matemáticas aplicadas;* está sacado de experimentos hechos á bordo del vapor *Castor*, que hace el servicio entre Honfleur y el Havre:

«De cada 100 caballos de vapor dados por esta máquina, se pueden contar 33,9 invertidos en vencer la resistencia del agua en la quilla, que es lo que constituye el trabajo útil; 58,2 se consumen en el retroceso, es decir, en poner el agua en movimiento; el rozamiento no gasta más que 7,9.»

El choque sucesivo de las paletas á su entrada y á su salida en el líquido produce en el buque una serie de trepidaciones molestas y fatigosas que se aminoran mucho dando á las paletas una ligera inclinacion en el sentido de su longitud. Entónces uno de sus extremos se sumerge ántes que el otro, ó si se quiere, la inmersion es sucesiva en toda la longitud de la paleta. Por este medio, el choque y las trepidaciones son casi insensibles.

En las aguas tranquilas en que los barcos pueden conservar una posicion casi horizontal de equilibrio, las ruedas de paletas prestan un servicio excelente. Pero no sucede así en el mar, en el que la accion del oleaje hace inclinar el buque á derecha ó á izquierda, impidiendo esta inclinacion que el eje de las ruedas se conserve horizontal. Las dos ruedas se sumergen entónces en el agua con desigualdad, de suerte que la accion de cada una sobre el líquido y sobre el movimiento de propulsion es tambien desigual, resultando de aquí para la direccion del buque una desviacion enojosa y además una pérdida de fuerza y de velocidad.

Hablo aquí del principal inconveniente de las ruedas de paletas, del que afecta á la marcha de toda clase de buques. Pero en la marina de guerra estas ruedas tienen otro inconveniente más grave; reducen la potencia ofensiva ocupando un sitio que reclama la artillería, y tambien la defensiva exponiendo al propulsor y al motor mismo al fuego del enemigo.

De aquí ha resultado que la trasformacion

de la marina militar de vela en marina de vapor se retardó hasta el momento en que la invencion de un nuevo propulsor, que no está sujeto á ninguno de los dos inconvenientes que acabo de indicar, hizo posible la aplicacion del vapor en grande escala á las escuadras de guerra.

Este nuevo propulsor es la *hélice*, que, así como las ruedas de paletas, el vapor mismo, y otros muchos inventos mecánicos, industriales, etcétera, ha sido objeto de una serie bastante numerosa de pruebas y tanteos ántes de llegarse á un resultado práctico que á su vez va casi siempre seguido de numerosos progresos y perfeccionamientos.

III

LOS VAPORES DE HÉLICE

La hélice no es otra cosa sino una rosca ó un fragmento de rosca, que, formando cuerpo con el barco, avanza en el agua arrastrándolo en la tuerca movediza constituida por el líquido elemento.

El movimiento de rotacion de las espiras alrededor del eje del propulsor lo produce una máquina de vapor instalada á bordo del buque.

Todo cuanto hemos dicho acerca de la accion propulsora de las ruedas de paletas es aplicable á la hélice. Tambien se apoya en la masa movediza del agua, imprimiéndola un movimiento en sentido contrario á la marcha del barco, para hacerlo avanzar. Es, pues, inevitable que haya una gran fraccion del trabajo motor perdida estérilmente. Las ventajas de la hélice comparada con las ruedas de paletas son de otro género; mencionémoslas rápidamente.

La hélice va colocada á popa, en un cuadro rectangular que se deja abierto junto al codaste (fig. 254). El eje ó árbol motor que la lleva es paralelo á la quilla; se apoya por un extremo en un soporte, el cual es una plancha maciza sólidamente instalada en la bodega, y por el otro extremo atraviesa á popa el casco por una caja de estopa. La máquina pone este árbol y la hélice en movimiento ya directamente por medio de manubrios ó barras acodadas, ya indirectamente por medio de un engranaje.

Este propulsor está, pues, debajo del agua, y á tal profundidad, que los movimientos perturbadores del mar no ejercen ninguna accion sobre él, no estando por consiguiente sujeto, como las ruedas de paletas, á las desigualdades de accion de estas. Por otra parte, la hélice se halla casi enteramente al abrigo de los proyectiles, como asimismo las máquinas que la ponen en movimiento, puesto que están instaladas como ella en las partes inferiores del buque.

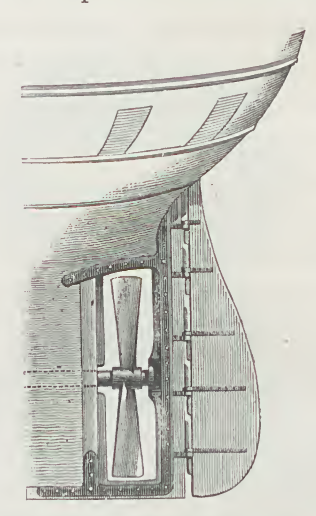


Fig. 254.—Colocacion de la hélice en los buques de vapor

Por último, y esta consideracion es de gran peso para la marina de guerra de vapor, su instalacion no perjudica á las baterías de artillería.

En general, la hélice ofrece tambien otra ventaja sobre las ruedas de paletas y es que su instalacion deja espacio libre para las maniobras, de suerte que los vapores de hélice pueden tener un aparejo á propósito para navegar á la vela cuando el viento es favorable, lo cual, económicamente considerado, es muy ventajoso. Los barcos mixtos, de vela y ruedas, son por el contrario de difícil maniobra.

Tracemos en pocas líneas la historia de la invencion de la hélice ó de su aplicacion á la navegacion por vapor.

Así como con la rueda de paletas, tratóse al principio de hacer funcionar la hélice con motores animados, el hombre ó los animales. Duquest (1727) utilizaba la corriente de los rios para remolcar los buques, sirviéndose del tornillo de Arquímedes. Paucton (1768) empleaba una helicoide de cuatro brazos, á la cual imprimia el movimiento por medio de la potencia motriz de los tripulantes.

En 1803, el ingeniero Dallery obtuvo un privilegio de invencion por un propulsor mo-

vido por vapor y compuesto de dos roscas: la una de eje móvil, situada á proa, servia de timon; la otra, puesta á popa, añadia su impulso al de la precedente, de lo cual resultaba la marcha del buque.

Los nombres de los ingleses Shorter (1802), Samuel Brown (1825), del capitan de ingenieros francés Delisle (1823), de los hermanos Bourdon, de Sauvage (1832), deben citarse entre los de los que han concebido proyectos ó hecho pruebas para la aplicacion de la hélice á la propulsion de los buques.

Dos hombres, el mecánico inglés Smith al principio simple colono, y el ingeniero sueco Ericsson, pueden considerarse como los que resolvieron definitiva y casi simultáneamente el problema.

El *Arquímedes*, buque de vapor de 90 caballos, es el primero que ha navegado impelido por una hélice del sistema Smith, en 1838. Cuatro años despues, el *Princeton*, de 220 caballos, provisto de una hélice del sistema Ericsson, fué botado al agua en los Estados Unidos.

El sueco Ericsson verificó sus primeros ensayos en Inglaterra en 1837. El *Francis B. Odgen*, buque provisto de su propulsor, remolcó un bergantin de 140 toneladas con una velocidad de 7 millas por hora. Pero como Ericsson no recibiera ningun estímulo por parte de los ingleses, pasó á los Estados Unidos, donde su invencion fué acogida con el entusiasmo que merecia. Antes de su partida se habia puesto de acuerdo con Stockton, oficial de marina de los Estados Unidos, é hicieron júntos la travesía del Océano en el *Robert Stockton*, vapor de hélice de 70 caballos, y desembarcaron en las costas de la gran república. El *Princeton*, anteriormente citado, siguió de cerca á este primer buque, construido en Inglaterra.

Francia imitó en 1842 el ejemplo dado por las dos grandes potencias marítimas, y se construyó en el Havre un buque de 130 caballos provisto de una hélice sistema Ericsson.

Despues, la trasformacion de la marina de vela en marina de vapor y de hélice hizo en el mundo grandes progresos. Los buques mercantes, los vapores-correos siguieron el ejemplo, sin que á pesar de ello se haya abandonado el sistema de ruedas que tambien tiene sus ventajas.

No es este el lugar oportuno para trazar la historia de tales cambios: volvamos pues á la descripcion de los sistemas de hélice adoptados para hacer en seguida la de las máquinas de vapor marinas que nos interesan más particularmente.

Las primeras hélices de Smith eran de un paso entero en el sentido del eje; más adelante las redujo á medio paso, pero duplicándolas.

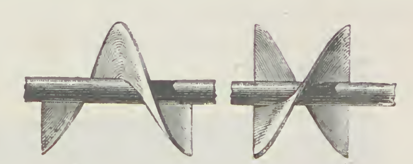
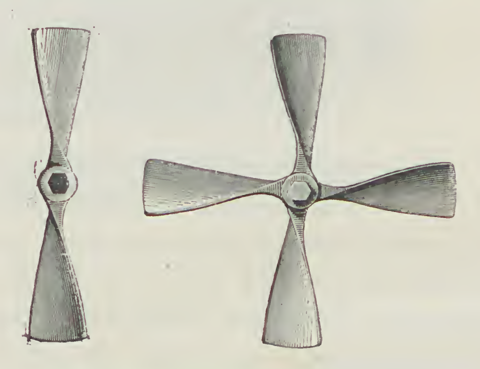


Fig. 255.—Primeras hélices de Smith: hélice sencilla de paso entero; hélice doble de medio paso

La experiencia hizo ver muy pronto que podia y debia reducirse considerablemente la extension de las espiras en el sentido del eje. Hoy se emplean fracciones de paso mucho más pequeñas, y se multiplican los brazos ó alas del propulsor, que no obstante por lo comun no pasan de cuatro y á veces de dos. El uso de



Fig, 256.—Hélices de dos y cuatro brazos

las hélices de seis alas tiene más inconvenientes que ventajas, puesto que la accion de las unas perjudica á la de las otras. Lo que da á este propulsor toda su fuerza es la extension ó diámetro de los brazos de la hélice así como la rapidez de su rotacion.

Para terminar diremos que con objeto de evitar la resistencia que presentaria la hélice en el caso de que la vela sustituya á la accion del vapor, se la arregla, ya para ponerla *loca* ó ya para retirarla momentáneamente de su cuadro. Para este último caso hay una cavidad ó pozo á popa; se levanta la hélice y se la hace pasar por dos correderas á dicho pozo, en donde se la puede examinar y componer si hay necesidad de ello.

IV

CALDERAS Y MÁQUINAS MARINAS

Conocemos ya el propulsor de los buques de vapor.

Veamos ahora cómo este flúido, única fuerza motriz bastante poderosa para reemplazar la fuerza inconstante y á menudo contraria del viento, imprime á las ruedas ó á la hélice el movimiento de rotacion.

La máquina de vapor, tal cual la hemos descrito, ¿sufre alguna modificacion esencial cuando se convierte en máquina de navegacion? No. En realidad, no tan sólo el principio es idéntico, sino tambien los órganos principales, el generador, el mecanismo motor y el de trasmision: como vamos á ver, no se hace más que someterlas á las necesidades particulares de la instalacion en un buque.

Las máquinas de baja presion y de condensacion, es decir, las máquinas de Watt de balancin, únicas que en su orígen se empleaban en la industria, formaban el tipo de las máquinas de navegacion, ya en los rios y lagos, ya en el mar. Aun hoy dia, es ventajoso utilizarlas en los vapores de ruedas. Sus movimientos son lentos como es sabido, pero esta lentitud encuentra ámplia compensacion en la regularidad de su modo de funcionar. Verdad es que son pesadas y ocupan mucho sitio, pero es fácil acercarse á todas sus partes para vigilarlas, cuidarlas y en caso necesario, para componerlas. Eran las máquinas que habian adoptado las marinas de guerra de Inglaterra y Francia, ántes que la invencion de la hélice hubiera cambiado las condiciones del problema.

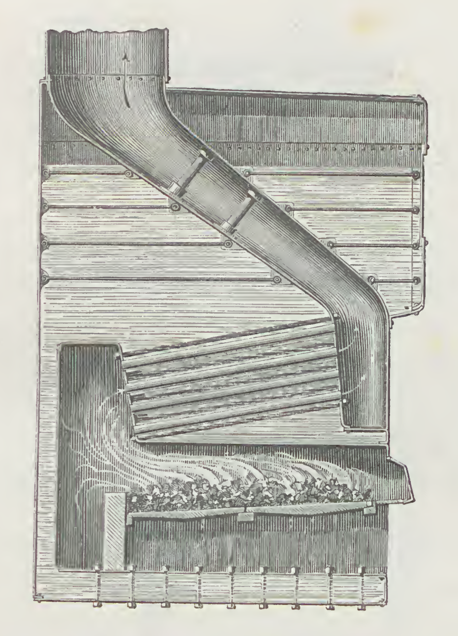


Fig. 257.—Seccion de una caldera tubular de retorno de llama

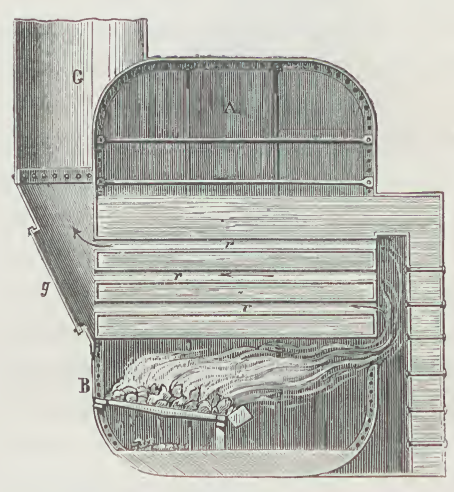


Fig. 258.—Seccion de una caldera tubular marina de retorno de llama

Por lo que respecta á la hélice, las máquinas de este tipo dan un movimiento de rotacion muy poco rápido, que seria sin duda fácil multiplicar por medio de engranajes, pero á costa de la fuerza efectiva de las máquinas ó de su trabajo útil.

Se ha adoptado generalmente la condensacion, no tan sólo en donde es necesaria, es decir, en las máquinas de baja presion, sino tambien en las máquinas marinas de media y alta presion. La abundancia de agua hace cómodo y económico el uso de los condensadores.

Las máquinas de vapor empleadas en la navegacion son las de más fuerza que se conocen. No es raro que su fuerza efectiva se mida por centenares de caballos de vapor, sino que en ciertos buques de guerra hay que contarlos por millares. Añadamos á esto que la valuacion de la fuerza de las máquinas marinas en caballos de vapor—lo que se llama fuerza nominal,—se hace de distinto modo que para con las máquinas terrestres. El *caballo de baja presion*, el *caballo nominal* en la marina, no tan sólo vale 75 kilográmetros, sino más de 100; por término medio 107 en el árbol motor, y 135 en los ém-

bolos. Esto consiste en que la pérdida de trabajo motor invertido en el retroceso ha obligado á los constructores á aumentar la fuerza para producir más trabajo útil. Hoy mismo, las cifras que acabamos de indicar son muy bajas; en la marina de guerra, el caballo de vapor *nominal* llega á 300 kilográmetros.

Por esta cuenta, la fragata de vapor *Friedland*, cuya máquina tiene una fuerza efectiva de 4,000 caballos de 75 kilográmetros, no debe valuarse, en cuanto á su fuerza nominal, sino en 1,000 caballos.

Para obtener semejante fuerza, ha sido preciso emplear generadores capaces de vaporizar pesos de agua considerables y, por consiguiente, con una gran superficie de calefaccion.

Así es que se emplean generalmente calderas tubulares de retorno de llamas, por el estilo de las que representan las figuras 231,257 y 258. Además, no basta una sola caldera ni un solo hogar, y la cantidad de combustible quemado es asombrosa. Citemos algunas cifras.

El *Algeciras*, de 900 caballos, tiene una máquina provista de 8 cuerpos de caldera cuyas hornillas, cuando están encendidas á la vez, queman 4,146 kilógramos de hulla por hora.

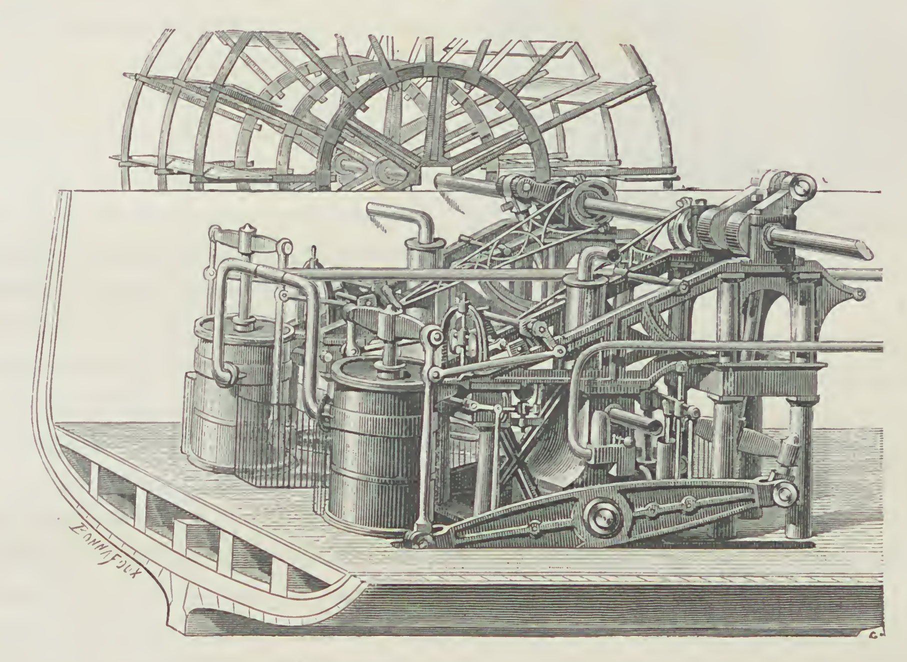


Fig. 259.—Máquina de balancin del vapor de ruedas *Sphinx*

El *Napoleon*, de 950 caballos, tiene tambien 8 cuerpos de caldera y 40 hornillas que queman 3,635 kilógramos de hulla por hora. La presion del vapor apénas excede de 2 atmósferas.

La fragata acorazada *Friedland*, que con su cargamento completo de carbon y municiones, pesa 7,200 toneladas, consume á toda marcha 5,200 kilógramos de hulla por hora ó sea 125 toneladas por dia de navegacion continua. Es, pues, un gasto que con arreglo al precio del carbon de piedra, puede variar de 4,000 á 5,000 francos diarios, por lo que hace al combustible únicamente.

El aspecto exterior de las máquinas y calderas marinas apénas se parece al de las máquinas de vapor empleadas en la industria manufacturera. Aunque todos sus órganos sean de dimensiones considerables, se los ha acondicionado de modo que ocupen el menor espacio posible; calderas, condensadores, mecanismo motor, etc., todo está reunido como puede verse examinando las figuras 259 y 260.

La primera es una máquina de balancin, de media presion, con expansion y condensador. El balancin oscila debajo del émbolo y del cilindro, disposicion que hace necesaria la situacion del árbol motor ó la del eje de las ruedas, que ocupa forzosamente un sitio elevado en los vapores de esta clase. Esta máquina pertenece al vapor *Sphinx*.

Las bielas van unidas directamente al árbol que está acodado en dos de sus puntos para formar dos manivelas de ángulo recto, cada una de las cuales recibe la accion de un cilindro.

Aquí los cilindros son verticales. Cuando se aplicó el mismo tipo de máquinas á la hélice,

colocáronse horizontalmente los cilindros y en un sentido trasversal; mas para dar al árbol suficiente rapidez de rotacion, hubo que recurrir á un sistema de engranaje. En breve se prefirieron las máquinas horizontales con dos cilindros sin balancin, y las bielas ejercieron su accion en el mismo árbol de la hélice, acodado en ángulo recto.

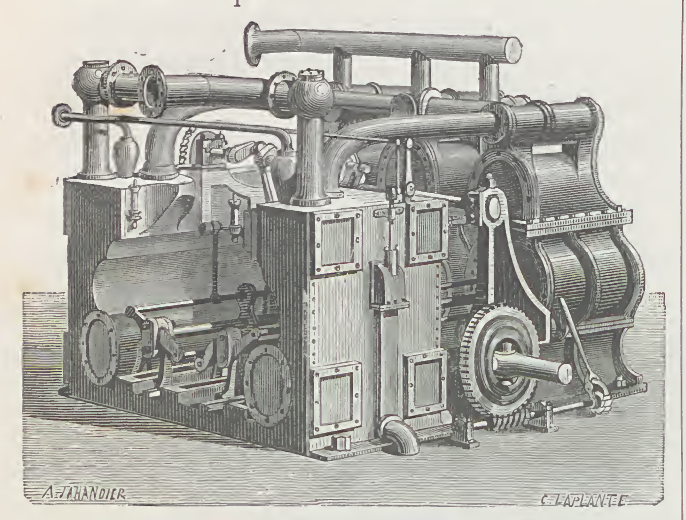


Fig. 260.—Máquina marina de dos cilindros con expansion y un cilindro de toda presion

Los cilindros de las máquinas marinas suelen tener dimensiones colosales. Para no citar más que un ejemplo, diremos que los cilindros de la máquina del *Friedland* tienen un diámetro interior de 2m,10 y la marcha de sus émbolos recorre 1m,30. Así es que la presion del vapor se ejerce en cada émbolo en una superficie de unos 3m,50; y suponiendo la tension del vapor de 2 atmósferas y media, esta presion equivale á unos 90,000 kilógramos.

Para guiar émbolos de esta dimension, se usan, no uno, sino dos ó cuatro vástagos, que se articulan por medio de una traviesa á la biela, la cual se articula á su vez con el árbol motor.

La máquina marina de vapor que acabo de citar no es tan sólo notable por sus dimensiones, por su fuerza y por la velocidad que imprime al buque en que está instalada, velocidad que en tiempo de calma no baja de 28 kilómetros por hora. Su hélice tiene 6m,10 de diámetro: la hemos visto girar sobre su árbol en la Exposicion universal de 1867; colocándose en el sentido del movimiento de las alas, se sentia en el rostro la impresion de la corriente de aire producida por la evolucion de las enormes espiras. Pero, lo repito, esta máquina se distingue tambien como tipo de cualidades especiales. Digamos unas cuantas palabras acerca de ella para terminar.

Es una máquina de expansion del sistema Woolff, pero con la particularidad de tener tres cilindros iguales del mismo diámetro y marcha. El vapor penetra en un solo cilindro, el de en medio, y despues de trabajar á toda presion, pasa á los dos cilindros laterales, en los que se distiende escapándose luégo á dos condensadores separados. Al salir de las calderas, el vapor circula por un aparato secador, y luégo se bifurca en las camisas-envolventes de los cilindros extremos. En igualdad de fuerza y peso, obtiénese con este sistema de máquinas, comparado con el de dos cilindros, una economía notable de combustible.

Además, como los codos ó manivelas del árbol motor que reciben las cabezas de biela están dispuestos en ángulo recto para los codos correspondientes de los émbolos extremos, y en la prolongacion de la bisectriz de este ángulo para el codo de en medio, resulta la ventaja de que todas las piezas movibles conservan casi enteramente el mismo equilibrio alrededor del eje del árbol, cualquiera que sea la posicion que el oleaje haga tomar al buque.

De algunos años á esta parte, se usan mucho en marina las máquinas Compound, que no son otra cosa sino máquinas de expansion del sistema Woolff de dos cilindros, pero en las que la colocacion y distribucion de los cilindros están combinadas de un modo especial. Se dividen en tres sistemas especiales, segun que los cilindros sean verticales, en cuyo caso los émbolos actúan en el extremo de un balancin, ó bien estén colocados horizontalmente punta con punta y dos émbolos enfilados en un mismo vástago, ó que, como en la máquina Dupuy de Lôme (del *Friedland*) haya tres cilindros en que los émbolos pongan en accion manivelas á 90°. Las máquinas Compound no se emplean únicamente en la navegacion por vapor.

Las de tronco y las oscilantes, que hemos descrito ya en el artículo consagrado al mecanismo de la trasmision, se usan á menudo en la navegacion fluvial ó marítima. Creemos haber dicho ya que la armada inglesa emplea especialmente las primeras. Por lo general, las diferencias que se observan entre las máquinas fijas terrestres y las marinas dependen casi siempre de su colocacion y acondicionamiento.

CAPÍTULO XI

LA LOCOMOTORA

I

EL VAPOR EN LOS CAMINOS DE HIERRO.—PRIMERAS LOCOMOTORAS

Las primeras pruebas de carruajes movidos por el vapor de agua se remontan al ingeniero francés Cugnot que en 1769 ideó y mandó construir en Paris un carreton destinado á circular por las carreteras impelido por el vapor. Más adelante, en 1804, Oliverio Evans construyó en Filadelfia el primer carruaje de este género que se ha visto en América. Por la misma época, una máquina locomotora circuló por el camino de hierro de Merthyr Tydwil, en Inglaterra, invencion debida á los ingenieros Trewitick y Vivian.

La locomocion en los caminos por la accion del vapor no debia tener completo éxito y adquirir la inmensa extension que hoy tiene, hasta la adopcion de un nuevo sistema de vía, que en un principio se puso en uso para el trasporte de materiales en las minas de carbon de piedra. Los caminos de carriles, luégo de bandas salientes, al principio de madera y despues de hierro ó acero, disminuian considerablemente la resistencia á la rotacion de los carros.

Pero, cosa curiosa, este progreso constituyó en su orígen un obstáculo para la adopcion de los carruajes de vapor. Como estos eran al principio muy ligeros, al girar rápidamente sus ruedas motoras, resbalaban sin avanzar, *patinaban* segun la expresion técnica. Ideáronse entonces diferentes medios para vencer esta dificultad práctica, cuando un ingeniero inglés, Blocket (1813) probó que puede lograrse la adherencia de la locomotora á los rails dando á aquella un peso bastante considerable, con tal que lo soporte el eje de las ruedas motoras. De esta época data la máquina de G. Stephenson, cuyos ejes hizo este solidarios por medio de una cadena sin fin. La adherencia de todas las ruedas de la locomotora quedó así utilizada.

Puede decirse que, á partir de aquel momento, la locomocion por las vías férreas por medio de carruajes movidos por el vapor era un problema resuelto prácticamente. Sin embargo, las primeras locomotoras no daban todavía un resultado satisfactorio; porque la cantidad de vapor que podian suministrar sus calderas era insuficiente para la carga ó la velocidad apetecidas.

La causa de este inconveniente está en la naturaleza de la caldera cuya agua la calentaba una hornilla interior por medio de un tubo que la atravesaba en toda su longitud. La superficie de calefaccion no era bastante considerable para la vaporacion que importaba obtener, y el tiraje era muy insuficiente.

Con todo, las locomotoras de Stephenson y de Hacworth realizaron, por diferentes conceptos, perfeccionamientos que no carecian de importancia; el mecanismo motor, la trasmision, la adherencia de las ruedas á los rails fueron objeto de arreglos y variaciones que seria prolijo describir. Hasta 1829, la locomocion por vapor no hizo más que los progresos de detalle de que hablamos.

Pero en esta época, la sustitucion de la caldera ordinaria por la caldera tubular con tiraje producido por un chorro de vapor, causó una verdadera revolucion en la aplicacion de las máquinas de vapor á la locomocion por las vías férreas. Débese á Marc Seguin la invencion de las calderas tubulares; gracias al enorme aumento de la superficie de calefaccion que de este modo se pudo conseguir, sin aumentar las dimensiones del generador, la vaporizacion creció en una proporcion que multiplicó la fuerza de las máquinas; pero para atender á esta produccion de vapor, era preciso conservar la acti-

vidad de la hornilla por medio de un tiraje enérgico que no podia dar la escasa altura de las chimeneas de las locomotoras.

Fué asimismo una feliz idea la de utilizar el vapor cuando acaba de ejercer su accion sobre el émbolo y hacerlo salir por la chimenea misma. De este modo produce á cada golpe del émbolo una corriente rápida que se lleva al exterior el aire y los gases de la combustion, y por los tubos atrae el aire al seno mismo de la hornilla.

La primera locomotora á la que se aplicaron estas dos reformas importantísimas, fué el *Cohete*, salida de los talleres de Roberto Stephenson, la cual obtuvo en 1825 el premio del concurso abierto en Liverpool.

II

LA LOCOMOTORA

Veamos ahora qué ha llegado á ser la locomotora despues de veinte años de perfeccionamientos sucesivos.

En las figs. 261, 262 y 263 damos una seccion longitudinal y dos trasversales de las partes anterior y posterior de la locomotora, que nos harán comprender las principales disposiciones de esta máquina.

Ocupémonos ante todo del generador. Acabamos de ver que la caldera de las locomotoras es tubular. Se compone de dos partes principales: una, situada en la parte posterior y de forma rectangular, contiene el hogar, que está rodeado de agua por todas sus caras ménos por la inferior; la otra, el *cuerpo cilíndrico*, así llamado por la forma de su cubierta, contiene dos capacidades distintas; en su mitad inferior están situados los tubos por los cuales pasan el humo y los gases de la combustion que van desde la hornilla á la chimenea. Todos estos tubos, que con frecuencia son en número considerable, están bañados por el agua de la caldera. La mitad superior del cuerpo cilíndrico es el depósito de vapor, que desemboca por un tubo acodado por delante y por detrás, *pssu* (fig. 261) por una parte en la cúpula y por

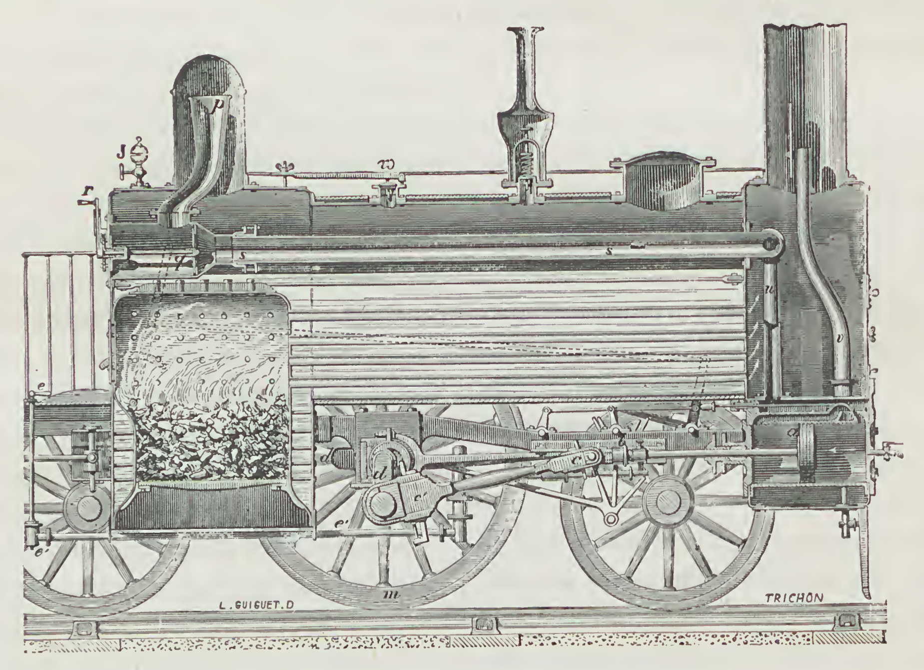


Fig. 261.—Seccion longitudinal de una locomotora

la otra en la caja de vapor de cada uno de los dos cilindros de la máquina.

Por medio de la manivela *r*, puede el maquinista abrir y cerrar cuando quiera las válvulas de un diafragma *q* que da paso al vapor, le detiene ó le introduce en proporciones variadas: esta manivela es lo que se llama *regulador*, y aquí, á causa de su forma, *regulador de mariposa*.

En la cara convexa del cuerpo cilíndrico se ven los aparatos accesorios ó de seguridad de toda máquina, como válvulas, manómetros, indicador de nivel, y silbato de alarma.

¿Cuál es el carácter distintivo de la marcha de una locomotora? En primer lugar, segun hemos dicho, la enorme extension de la superficie de calefaccion relativamente á la capacidad

total. Para demostrar hasta qué punto aumentan los tubos este elemento, citemos algunas cifras, En una locomotora Crampton, las cubiertas del hogar, es decir, la superficie de calefaccion por irradiacion, no es más que de 8^{m},65 cuadrados; la citada superficie por contacto, es decir, la de los tubos rodeados por los gases de la combustion, es de 88^{m},92, ó si se quiere, *mas del décuplo*. En una máquina Engerth de mercancías, estos números son 9^{m},70 y 180^{m},70 respectivamente; los tubos aumentan la superficie de calefaccion en razon de 1 á 18,6. De aquí resulta el segundo carácter importante, el tiraje por el chorro de vapor, sin el cual la actividad del hogar no bastaria para tan considerable produccion de vapor, y por consiguiente el tipo de la caldera tubular para locomotoras perderia su principal ventaja.

«En las máquinas locomotoras, dice M. Perdonnet, el metro cuadrado de superficie de calefaccion produce doble ó triple vapor que en las calderas de máquinas fijas.»

Las locomotoras son máquinas de alta presion sin condensacion, lo cual es una consecuencia necesaria de lo que acabamos de decir. Es menester que el vapor se escape por el aire, y

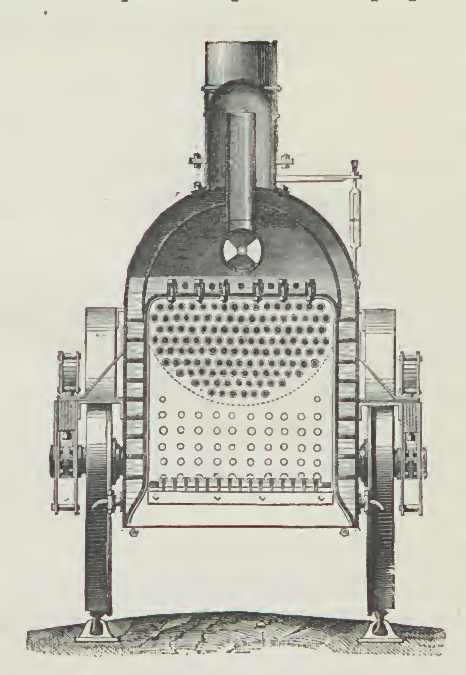


Fig. 262.—Locomotora: seccion trasversal en la caja de fuego

por lo tanto no pueden ser de baja presion; requiérese tambien que al escaparse forme un chorro ó corriente, y por consiguiente no puede condensarse. Por lo general se le emplea á una presion de ocho á nueve atmósferas.

Pero funciona con expansion, y un mecanismo particular, la corredera de Stephenson, permite hacerla variar así como cambiar la direccion del movimiento. Tanto una locomotora como un buque de vapor han de poder marchar atrás y adelante, y fácil es comprender la necesidad de semejante maniobra.

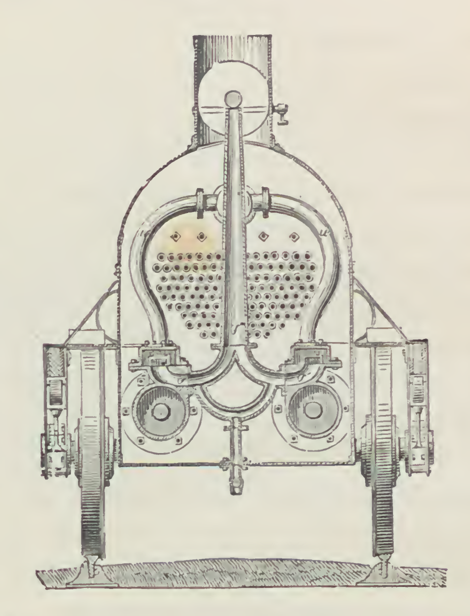


Fig. 263.— Locomotora: seccion trasversal en la caja de humo

Prosigamos nuestra descripcion.

Bajo el punto de vista del mecanismo motor, la locomotora está en realidad formada por dos máquinas de vapor acopladas. Tiene dos cilindros, provisto cada cual de su émbolo y de su caja de distribucion, moviéndose el vástago de los émbolos por medio de una biela en la manivela del eje que lleva el par de ruedas motrices. En ciertos tipos de locomotoras hay hasta cuatro cilindros, cuatro máquinas funcionando dos á dos en otros dos ejes distintos; pero aparte del acondicionamiento y de los detalles, el mecanismo motor de estas máquinas no tiene nada especial que la distinga del que ya hemos visto en las máquinas fijas, terrestres y marinas. Los grabados que insertamos, muestran cuál es la disposicion de los cilindros, comunmente situados en la parte de delante y que son tan pronto horizontales como ligeramente inclinados, unas veces situados fuera del bastidor que sostiene la caldera y la máquina y otras interiores. Aquí los cilindros son interiores y horizontales.

Fácil es comprender la distribucion y escape del vapor examinando la figura 261. El vapor, que va á parar por un tubo *ss* al espacio lla-

mado caja de humo, pasa por otros dos tubos *uu* á las cajas de vapor de los cilindros: despues de poner en movimiento los émbolos, atraviesa los tubos *vv'* y sale por el tubo vertical V que se ve en la base de la chimenea, por la cual se escapa produciendo esa especie de resuello cortado que se oye siempre en las locomotoras en marcha.

La rapidez con que este ruido, producido por el escape de vapor, se sucede en un tren que vaya á toda velocidad, indica cuán grande es el número de los golpes de émbolo en cada cilindro. Puede calcularse este número en vista de la velocidad de la locomotora: en los trenes rápidos llega esta á 60 y hasta á 80 kilómetros por hora. Suponiendo esta distancia recorrida por una locomotora de viajeros (sistema Crampton) cuya rueda motriz tiene 2^{m},30 de diámetro, ó 7^{m},20 de circunferencia, se ve que en una hora las ruedas han dado 11,111 vueltas, cada una de las cuales corresponde á una doble marcha de los émbolos, lo que equivale á tres marchas dobles ó á seis sencillas por segundo.

III

PRINCIPALES TIPOS DE LOCOMOTORAS

Si la locomotora tiene un carácter especial que la distingue de las demás máquinas de vapor, así de las fijas de la industria como de las movibles de la navegacion, no se sigue de aquí que constituya un tipo único y uniforme. Es un *género*, pero este género comprende numerosas variedades.

Estas variedades, de las que tan sólo puedo describir aquí las principales, han sido creadas sucesivamente para atender á las exigencias crecientes y múltiples de las nuevas vías de trasporte. Bajo este punto de vista, divídense las locomotoras en dos tipos bien marcados:

Las *locomotoras de viajeros*, destinadas exclusivamente al trasporte rápido de los convoyes de escasa masa; servicio de gran velocidad;

Las *locomotoras de mercancías*, consagradas especialmente á mover las cargas más pesadas; servicio de pequeña velocidad.

Naturalmente, ha habido que crear un tercer tipo intermedio entre los dos anteriores que participara de sus cualidades medias; tal es el de

Las *locomotoras mixtas*, usadas para arrastrar trenes que lleven á la vez coches de viajeros y wagones de mercancías, ó que puedan destinarse cuando se quiera al servicio de grande ó pequeña velocidad alternativamente.

Aparte de estos tres tipos principales, se han construido otros para servicios especiales. Pasaremos revista á algunas locomotoras de unas y otras clases.

El tipo por excelencia de la máquina de viajeros, de gran velocidad, es la locomotora Crampton (fig. 264), caracterizada por el diámetro considerable de sus dos ruedas motrices, por la corta marcha del émbolo, condiciones ambas que, unidas á una gran potencia de vaporizacion, la hacen el prototipo de las vías férreas. Hace cerca de cuarenta años que se usa y jamás ha cesado de corresponder á las necesidades del servicio. Goza de una gran estabilidad que dimana de lo bajo del centro de gravedad general y de la separacion de los ejes. Teniendo un peso medio de 30,000 kilógramos, arrastra convoyes de 12 á 16 coches de 100 á 130 toneladas de peso, con una velocidad de 60 kilómetros por hora, comprendidas las paradas.

Una locomotora Crampton, sin su tender, cuesta 65,000 francos.

Los sistemas Mac-Connel, Buddicom, Sturrock, Stephenson de tres cilindros, son tambien buenas máquinas de gran velocidad, usadas en los ferro-carriles extranjeros. El tercer cilindro de la máquina Stephenson tiene por objeto remediar el movimiento de serpenteo que adquiere la locomotora impulsada por los dos cilindros laterales y que se comunica á todos los coches del tren. M. Dupuy de Lôme ha empleado tambien tres cilindros en sus máquinas marinas por un motivo de equilibrio análogo.

Designaremos el tipo Engerth como el más marcado de las máquinas de pequeña velocidad destinadas á arrastrar pesados convoyes. Basta considerar su aspecto exterior, y compararla con una máquina Crampton para conocer desde luégo que se tiene delante una locomotora de gran pujanza, prototipo de las máquinas de mercancías.

La velocidad media de las locomotoras Engerth (las hay de muchas clases) es de 24 kilómetros por hora; pero arrastran convoyes

de 450 toneladas. Su peso llega á 63 toneladas, que se distribuyen en parte con el peso del tender sobre las ruedas de este último, pero que lo soportan principalmente cuatro pares de ruedas de diámetro igual enlazadas por bielas de union. Estas máquinas, al contrario de las del tipo Crampton, tienen muchos pares de ruedas motrices de pequeño diámetro, y sus émbolos una larga marcha en los cilindros. Gran longitud de la caldera, del cuerpo cilíndrico y de los tubos, y hogar de grandes dimensiones.

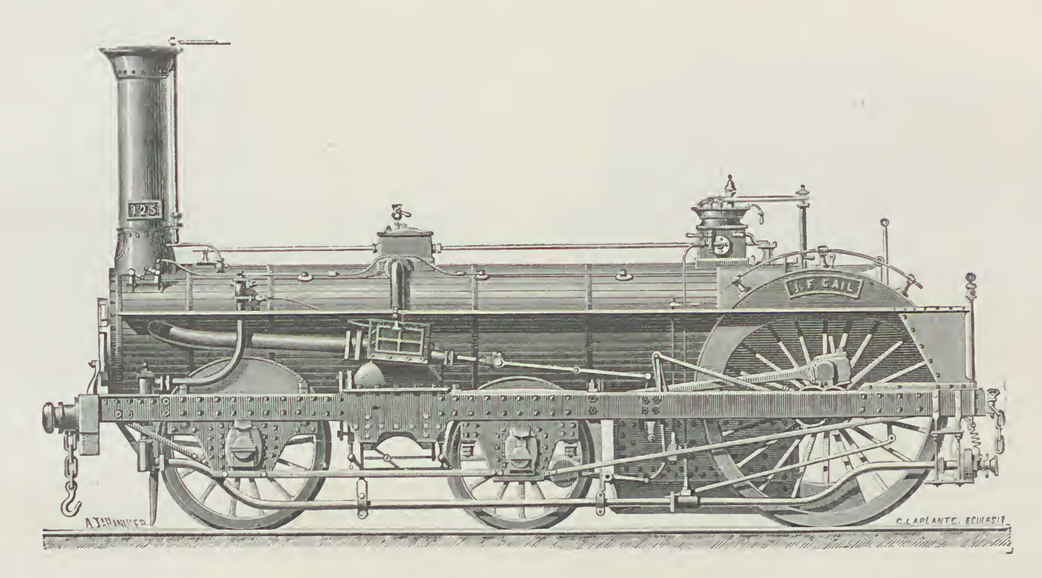


Fig. 264. — Máquina de gran velocidad: tipo Crampton

En esto, así como en la considerable superficie de calefaccion y en la potencia de vaporizacion, consiste el secreto de la enorme fuerza de traccion de que está dotado este tipo notable.

Las primeras máquinas Engerth (así llamadas del nombre de su inventor, ingeniero austriaco) estaban provistas de un sistema de engranaje que tenia por objeto permitirlas subir por las rampas del Sœmmering.

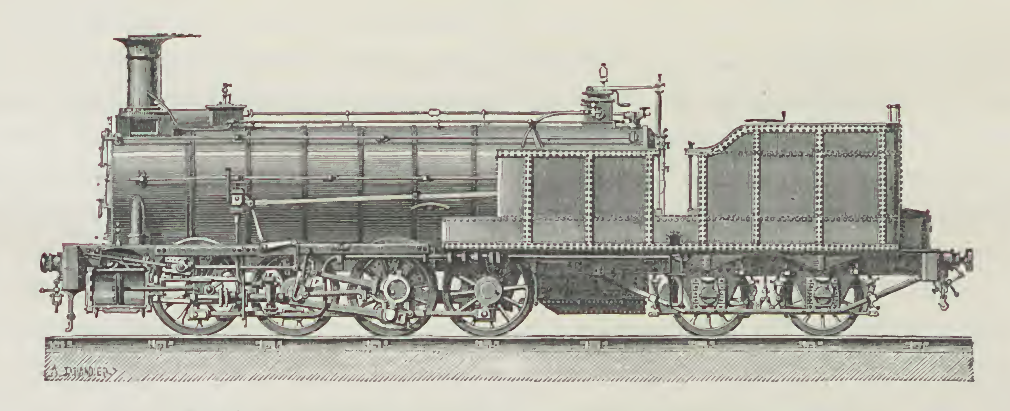


Fig. 265.—Locomotora de mercancías, pequeña velocidad : tipo Engerth

El tipo de las máquinas mixtas ó locomotoras de mediana velocidad participa de los dos primeros. Dos pares de ruedas acopladas, de un diámetro que varía entre $1^{m},50$ y $1^{m},70$, mediana longitud de la marcha del émbolo, peso de 25 á 30 toneladas, velocidad reglamentaria de 45 kilómetros por hora, arrastre de 180 á 200 toneladas, todos estos elementos, como se ve, están comprendidos entre los elementos correspondientes de los sistemas extremos. De aquí se sigue el empleo de máquinas, ora económicas y de escasa fuerza relativa, ora costosas y complicadas, pero con una fuerza de traccion capaz de remolcar las más pesadas cargas, así en tiempo de nieblas como de lluvias, y de subir por las considerables rampas adoptadas hoy en gran número de líneas nuevas. Estas últimas máquinas llevan el nombre de *locomotoras de montañas ó para fuertes rampas.*

Para completar esta reseña, seria preciso

multiplicar las descripciones y los grabados; citar las *locomotoras-tender* que prestan el servicio en las estaciones ó sirven de remolcadores á los convoyes de mucha carga; las *locomotoras de socorro*, despachadas en casos de accidentes, y luego los tipos de las líneas

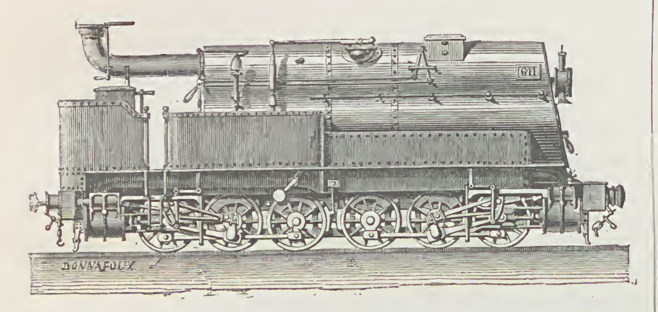


Fig. 266. — Máquina de doce ruedas acopladas y de cuatro cilindros.

extranjeras, las locomotoras de los ferrocarriles de Alemania y de los Estados Unidos, calentadas con leña y á las cuales dan un aspecto tan singular sus avantrenes articulados, y sus chimeneas tan desmesuradamente ensanchadas por la parte superior; pero estos detalles tan completos y circunstanciados no caben en los límites del plan que nos hemos trazado.

IV

LOS CARRUAJES DE VAPOR Ó LOCOMOTORAS DE CARRETERAS

Los primeros carruajes de vapor se idearon para los caminos ordinarios, y en ellos se ensayaron ántes de la invencion de los ferrocarriles, pero ya se ha visto que no tuvieron buen éxito.

Los motivos de este mal resultado eran varios: los unos procedian de la imperfeccion relativa de las máquinas de vapor empleadas para este uso, y tambien de los órganos del movimiento; los otros residian en la naturaleza misma de la vía por la que debian circular.

La fuerza de una locomotora se resume en cierto modo en su peso, áun cuando se padece un error creyendo que es preciso aumentar el peso para que haya más adherencia. Las ruedas, y las motrices sobre todo, soportan este peso siempre considerable y se alivian de él haciéndolo gravitar sobre el camino mismo, en los puntos en que se ponen en contacto con este. Ahora bien, por perfectamente empedrada y conservada que esté la carretera, el suelo se hunde bajo la presion, se abren baches y carriles y al poco tiempo las máquinas no pueden ya moverse.

En 1862, se emplearon en Lóndres locomotoras del sistema Bray para arrastrar por las carreteras, afirmadas por el sistema Mac Adam ó empedradas, pesados bultos, ó trenes cargados de masas demasiado enormes para que pudieran tirar caballos de ellas.

En 1864 se hicieron en Nantes experimentos con una locomotora de carreteras construida por el hábil mecánico M. Lotz. En el mes de agosto del siguiente año repitiéronse estos experimentos en Paris, y dieron resultados interesantes. Hé aquí su descripcion tomada del *Diccionario de matemáticas aplicadas* de M. Sonnet:

«La máquina de M. Lotz es de la fuerza de 5 caballos, y lleva su correspondiente tender. La caldera va sobre cuatro ruedas; el avantren puede girar alrededor de un eje perpendicular como los demás carruajes. Todo el mecanismo está colocado encima de la caldera. El árbol motor trasmite el movimiento á una de las ruedas traseras por medio de una cadena sin fin, que engrana con una rueda vertical solidaria con el eje. La llanta de las ruedas traseras tiene 20 centímetros de anchura, con lo cual ha evitado el constructor que se hagan carriles. Las ruedas están montadas sobre muelles, evitándose así las sacudidas bruscas que podrian falsear las bielas. Un hombre sentado en la parte anterior maneja las ruedas delanteras y hace girar el vehículo con la mayor facilidad por medio de una ruedecita vertical análoga á la que sirve para virar los timones de los buques.»

La velocidad de la locomotora Lotz llegaba á 16 kilómetros por hora en una carretera bien cuidada y arrastrando una carga de 5 á 6 toneladas; remolcaba de 12 á 15 toneladas con una velocidad de 6 kilómetros, subiendo cuestas que variaban de 7 á 13 centímetros.

Uno de los inconvenientes de este sistema de trasporte lo causan las variaciones considerables de los esfuerzos que deben ejercer unos motores cuya fuerza ha de ser constante. La locomotora Larmanjat obvia esta dificultad. A las ruedas motrices de gran diámetro que marchan con una velocidad de 16 kilómetros, por ejemplo, se las puede sustituir rápidamente otras dos ruedas de ménos diámetro, solidarias

y situadas en el interior de las primeras. Como esta sustitucion produce una disminucion en la velocidad de la máquina, velocidad que, segun creo, queda reducida á la mitad, la fuerza de traccion será doble, y la locomotora podrá ven-

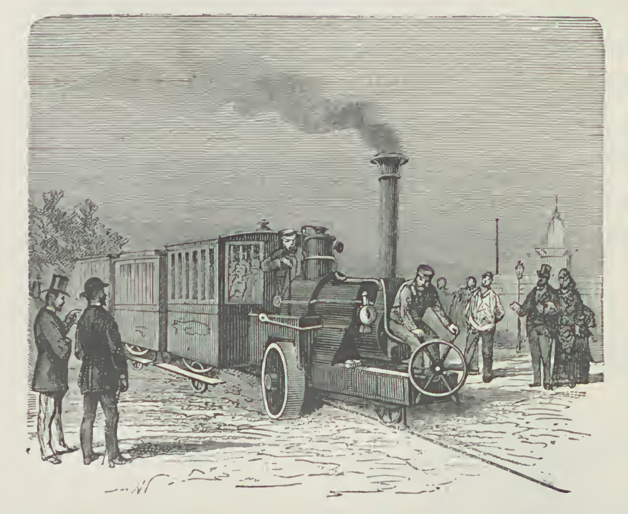


Fig. 267.—Locomotora de carreteras: sistema Larmanjat

cer entónces los obstáculos que las cuestas ó el mal estado del camino presenten en el trayecto. En la Exposicion universal de 1867 figuraba una máquina de este sistema, y de la fuerza de tres caballos. Salida de la estacion de Auxerre arrrastrando un pequeño carromato de ruedas bajas que llevaba una carga de más de 3,000 kilógramos, ha podido subir cargada de este modo y valiéndose de sus pequeñas ruedas, una larga rampa de 8 centímetros por metro, con una velocidad media de 8 kilómetros por hora. En las cercanías de Paris se han hecho otros experimentos que, segun parece, han resultado muy favorables á este sistema. La vista que insertamos de la locomotora de caminos de M. Larmanjat ha sido tomada del natural, en una de las numerosas pruebas hechas hace unos diez años en Paris, en el Trocadero.

Debemos citar tambien la locomotora de caminos de M. Albaret, de Liancourt (Aisne), con la cual se han hecho pruebas por espacio de dos años en los departamentos del Norte y del Jura, remolcando por caminos cuyas rampas llegaban á 5 y 6 centímetros, cargas de 12 toneladas con una velocidad máxima de 6 kilómetros por hora: la de M. Garret, que ha arrastrado entre Auxerre y Avallon, ida y vuelta, una diligencia con 15 personas, con la velocidad media de 11 kilómetros.

Los ingleses y los americanos no se han quedado atrás en esta clase de investigaciones, y han hecho numerosas tentativas para resolver prácticamente la cuestion de la locomocion por vapor en las carreteras. Para ellos, como para los ingenieros y constructores franceses, la principal dificultad estribaba en evitar los carriles ocasionados por el peso de la máquina. Por esto, en el sistema Boydell se utilizaba un rail sin fin por cima del cual pasaba la rueda y que descansaba en el suelo sujeto con anchos patines; la complicacion del mecanismo y la escasa velocidad obtenida han sido causa de que se deseche este sistema.

El sistema Bray habia adoptado ruedas de hierro de grandes dimensiones, provistas de uñas movibles en su circunferencia, pero esto daba por resultado un gran deterioro de los caminos.

Para resolver el mismo problema, un constructor de Edimburgo, M. Thomson ha ideado guarnecer las llantas de las ruedas motrices de su máquina con bandas de goma volcanizada que tiene un grueso de 125 milímetros por una anchura de 30 centímetros.

«Estas bandas, dice M. Sauvée, soportan perfectamente el peso de la máquina, y ruedan por los caminos ordinarios sin aplastar las piedras que hay en la superficie. Gracias á la elasticidad de la goma, el contacto entre la llanta y el suelo no tiene lugar segun una generatriz, sino segun una superficie sobre la cual está repartida la presion. Las ruedas no se hunden ya en el suelo, y áun si se hace pasar la locomotora por una carretera recien engravada, pasará sobre las piedras machacadas sin que las bandas de goma se corten ni deterioren. La fuerza invertida en hacer andar una máquina de esta clase será pues mucho menor que la que necesita una máquina de llantas lisas de hierro, porque en este último caso, la rueda estruja la grava y ocasiona una pérdida de fuerza notable.»

Una locomotora de este modelo ha podido circular por una pradera sin dejar apénas huella de su paso. En un camino horizontal puede remolcar 30 toneladas con una velocidad que varía entre 4 y 10 kilómetros por hora. Su fuerza efectiva es de 16 á 18 caballos. En Inglaterra se usan muchas para trasportar carbon desde la mina á las fundiciones próximas;

M. Thomson ha aplicado su locomotora en Edimburgo á la traccion de los ómnibus. Por último, en la India se han hecho segun parece algunas pruebas con ella por la administracion postal, para el trasporte de pliegos en la provincia del Penjab, entre las ciudades de Loodlana, Ferozepore y Lahore.

La locomotora de caminos de Thomson consiste en una máquina de cilindro horizontal C que por medio de una biela comunica el movimiento á un árbol motor dos veces acodado, provisto de un piñon cuyos dientes engranan con los de otra rueda calada sobre la rueda motriz. Gracias á esta disposicion, el eje R de las ruedas motrices se pone en movimiento con una velocidad que, relacionándose con la de los émbolos, depende del número de dientes de la rueda y del piñon. Pero el árbol motor está provisto de otro piñon que engrana con una segunda rueda calada á su vez sobre otro árbol motor paralelo al primero, y este último, por medio de un tercer piñon, comunica su movimiento á la primera rueda de engranaje. Estos dos sistemas funcionan aisladamente; el maquinista pasa cuando quiere de uno al otro con el auxilio de unas palancas que tiene á su alcance, y puede tambien variar, sin que sea distinta la accion del vapor, la velocidad de las ruedas motrices en razon de doble contra sencillo (ó más exactamente de 16 á 39) (1).

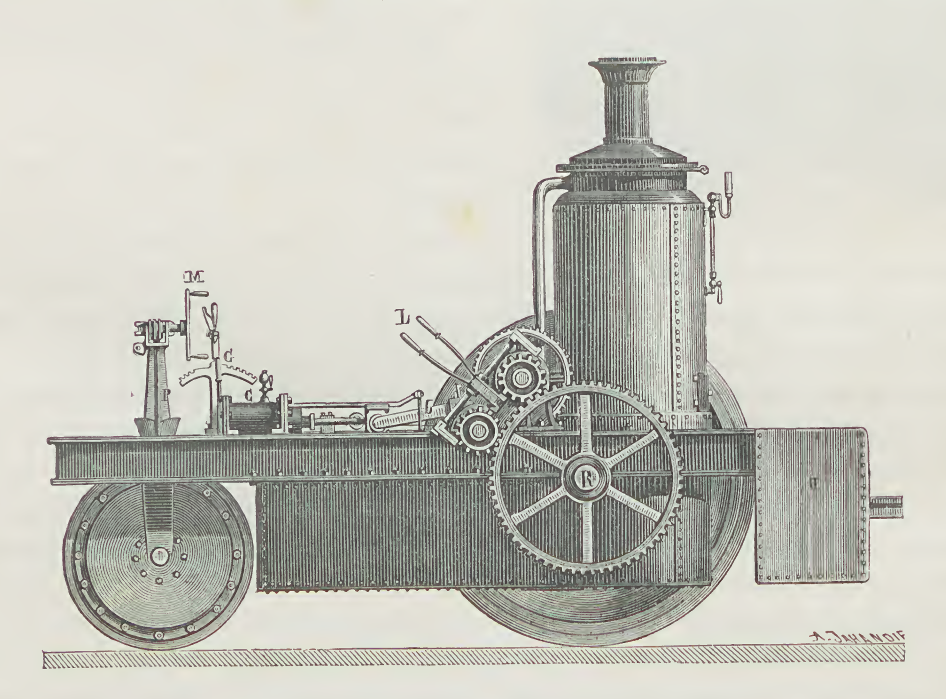


Fig. 268.—Locomotora de carreteras: sistema Thomson

(1) Como se ve, puede considerarse resuelto el problema mecánico de la locomocion por vapor por las carreteras. ¿Quiere esto decir que se generalizará pronto el uso de las locomotoras de carreteras? Difícil es contestar á esta pregunta; porque, junto al punto de vista técnico, está el industrial y comercial. Es menester que este medio de trasporte sea realmente económico, lo cual depende sin duda de una porcion de circunstancias extrañas á la mecánica. En las grandes ciudades como Lóndres y Paris, en donde las necesidades de la circulacion son tan continuas y apremiantes, se podrán emplear con provecho las locomotoras de carreteras, si se discurren medios que hagan prudente este uso, y se precaven los peligros que ocurririan á cada momento á causa del encuentro frecuente de coches y viandantes. Este sistema de locomocion se ha ensayado ya en una de las grandes vias que el municipio parisiense ha establecido con el nombre de *tranvías*, pero ha habido que abandonarlo.

V

LA LOCOMÓVIL

Fáltanos examinar un cuarto tipo de máquinas de vapor, recien creado, cuyo uso se extiende cada vez más y que sólo tiene de parecido con la locomotora el nombre y el aspecto exterior. Nos referimos á la *locomóvil*.

En realidad, la locomóvil es una máquina fija, pero una máquina fija trasportable. Relativamente ligera y poco embarazosa, está colocada, como la locomotora, sobre un bastidor y montada sobre ruedas; la caldera, el mecanismo motor, el volante, todo está reunido de manera que funciona sin ninguna preparacion, como no sea la de la alimentacion de agua y de fuego. Cuando ha acabado su servicio en un punto, llévasela á otro donde sea necesario el

trabajo de su fuerza motriz, que suministra sucesivamente en sitios distantes entre sí. Las ruedas de la locomóvil no son, como las de la locomotora, ruedas motrices; absolutamente independientes del mecanismo, no tienen más que un objeto: facilitar el traslado de la máquina por los caminos ó por los campos. Uno ó dos caballos enganchados á la lanza bastan para ello.

Hoy dia es un motor empleado en todas partes. En la agricultura, en las construcciones industriales, las locomóviles sirven para una porcion de usos y reemplazan con ventaja á los motores animados.

En los talleres de albañilería de cierta importancia, las locomóviles son las encargadas de izar los materiales; ponen en movimiento las cábrias; dan vueltas á los molinos para moler y fabricar la argamasa; sustituyen á los obreros que levantan los motones para plantar estacas ó que manejan las gruas. Las gruas de vapor movidas por locomóviles se encuentran hoy en casi todos los puertos.

Úsanse tambien para hacer jugar las bombas

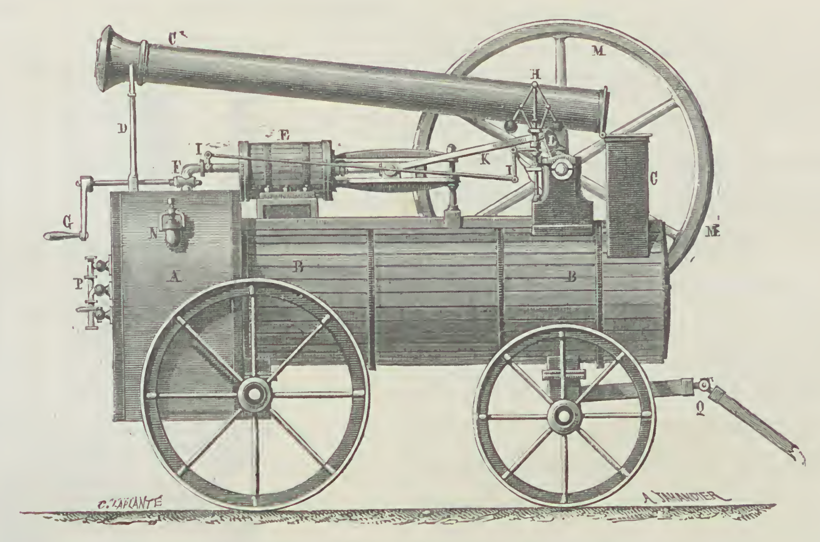


Fig. 269.—Locomóvil Calla: A, BB, caja de fuego y cuerpo cilíndrico tubular; C, chimenea; E, cilindro; M, volante; K, L, biela y manivela; HH, regulador

instaladas provisionalmente con objeto de extraer el agua de los terrenos de construccion.

En la agricultura, es el motor adoptado hoy en todos los casos en que se introduce el uso de la accion del vapor. En las faenas agrícolas propiamente dichas, particularmente en la siembra, es una locomóvil la que, instalada en uno de los extremos del campo, comunica su movimiento á los aparatos que conducen la reja del arado, y otro tanto sucede en las operaciones de la industria agrícola que tienen por objeto los productos, su conservacion, transformacion, etc., como máquinas de batir, de picar la paja, trituradoras, estrujadoras, etc. Donde quiera que se trate de grandes masas, puede haber, y hay en efecto, ventajas en sustituir los motores animados ordinarios, los hombres y animales, por el motor por excelencia, por el vapor.

Las locomóviles son máquinas que han recibido formas sumamente variadas segun su destino y la idea de los constructores. Nos bastará describir uno de los tipos adoptados para que se comprenda el mecanismo de todos los demás. Tomemos por ejemplo la locomóvil Calla.

La caldera es, como la de las locomotoras, una caldera tubular, compuesta de un hogar A situado en la parte de atrás, y de un cuerpo cilíndrico BB que contiene los tubos. La fuerza de las locomóviles es escasa; se las construye de uno, dos, hasta ocho caballos. No hay por consiguiente necesidad de una superficie de calefaccion tan grande como en las locomotoras, por lo cual los tubos son más gruesos y no tan numerosos.

La máquina es de alta presion y sin condensacion, escapándose el vapor por la chimenea para producir el tiraje, el cual no debe activarse demasiado á fin de que no salgan fuera del hogar rescoldos ó cenizas candentes, á lo ménos cuando se hace trabajar á la locomóvil cerca de materias inflamables, como suele suceder en la

agricultura; de lo contrario, correria el riesgo de prender fuego á las mieses.

En la locomotora representada en la fig. 269, el cilindro es horizontal y está colocado encima de la caldera. El vástago del émbolo, que se desliza por una corredera, pone en movimiento la biela K, que se articula con la manivela del árbol motor y del volante. Al pié del grabado se indican cuáles son los órganos ordinarios de la máquina, que no tienen nada de particular. En América se construyen máquinas locomóviles de caldera vertical, lo propio que el mecanismo motor.

Las locomóviles son máquinas poco económicas; consumen de 5 á 6 kilógramos de hulla por hora y por caballo. Hemos dicho que son ligeras, y en efecto, el peso de una máquina de 4 á 5 caballos no excede de dos toneladas.

VI

VARIAS APLICACIONES DEL VAPOR

Acabamos de ver lo que es la máquina de vapor y los principios de física y de mecánica en que está basada su construccion; cuáles son las formas variadas que se le han dado para apropiarlas á los múltiples servicios que de ella exigen la industria manufacturera, la de trasportes terrestres y marítimos, las obras públicas y la agricultura. Réstanos añadir algunas palabras acerca de las aplicaciones mismas del vapor y del importantísimo papel que desempeña en las sociedades modernas.

Hemos visto que las primeras máquinas de vapor se emplearon en sacar las aguas de las minas: eran los motores de poderosas bombas, y hoy todavía sirven para los mismos trabajos. En las grandes ciudades las máquinas de vapor son tambien las que sacan de los rios y otras corrientes el agua necesaria para las atenciones públicas ó domésticas, por ejemplo, en Paris las de Chaillot, Saint-Maur y Ménilmontant.

En Inglaterra y en Holanda se han instalado máquinas de vapor para hacer funcionar las bombas empleadas en la desecacion de pantanos y lagos, como los de Harlem, de Zuid-Plas, y hoy se trata de desecar del propio modo todo el Zuiderzee.

La locomóvil se usa más especialmente en las obras públicas; acabamos de ver que pone en movimiento los motones para empotrar estacas, para subir materiales á los edificios en construccion, para las gruas de los caminos de hierro y de los puertos. El vapor mueve las dragas, los remolcadores de los rios y canales, las barcas para vadear las corrientes y las bombas contra incendios. Entre las aplicaciones interesantes de su potencia mecánica, hay que citar las mil operaciones que tienen por objeto la fabricacion de las máquinas mismas, y especialmente la forja de las grandes piezas metálicas. El artefacto que sirve para este uso es el *martinete*, acerca del cual creemos deber dar algunos detalles.

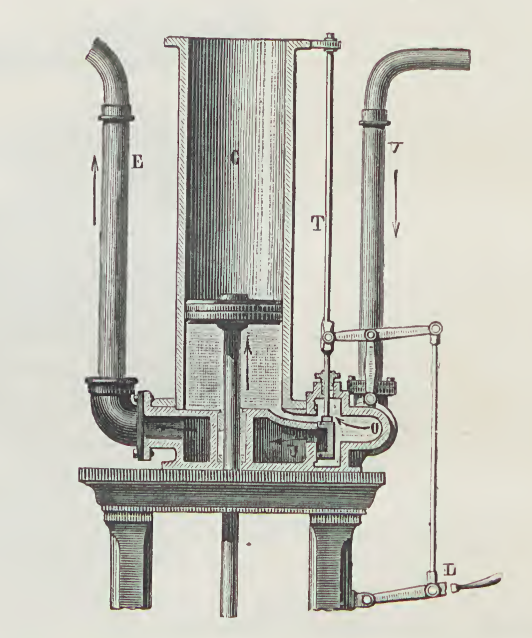


Fig. 270.—Seccion del cilindro de un martinete de vapor

El martinete de vapor, que tanto ha contribuido á desarrollar la fabricacion del hierro, esa primera materia de la mecánica y de la industria moderna, fué inventado hácia 1841 por M. Bourdon, director de las forjas del Creuzot. Estos gigantescos martillos, usados en todas las fundiciones en las que se forjan el hierro y el acero en piezas de grandes masas, no reciben su movimiento de la máquina de vapor, sino que es el vapor el que los sube ó baja directamente entre dos montantes de hierro que les sirven de guía en sus idas y venidas.

La fig. 270 muestra cómo funciona el martinete de vapor. Supóngase un moton de hierro, cuyo peso llega hasta 15,000 kilógramos, que corre entre dos montantes ó guías y está suspendido de la fuerte barra del émbolo de un cilindro en el que se hace penetrar el vapor cuando se quiere. Este llega por el tubo V á

un orificio practicado en la parte inferior del cuerpo de bomba debajo del émbolo que es entónces empujado de abajo á arriba por la fuerza elástica del flúido. Por medio de una palanca L, se actúa sobre una barra T que hace bajar una caja de distribucion lateral, y el vapor se escapa por una chimenea UE al aire libre. El vapor obra aquí por simple efecto, pero se construyen martinetes en que sirve á la vez para levantar la enorme masa y precipitarla en su caida. Hé aquí algunos detalles sobre uno de esos ingenios, tomados de la obra titulada *Las Grandes fábricas*, de M. Turgan.

«La compañía australiana del ferrocarril Victoria ha encargado un enorme martinete de vapor que se ha construido en la fundicion de Kirkstall en Leeds (Inglaterra). Este martinete es de doble ó de simple efecto; así es que el vapor funciona en dos sentidos, es decir, que puede alternativamente levantar el martillo y pasar luégo por encima de él para precipitar su caida y aumentar por consiguiente la accion de la gravedad. Esta disposicion, que permite al mismo tiempo multiplicar el número de golpes en un tiempo dado, es sumamente ventajosa para forjar piezas de grandes dimensiones; gracias á ella, se puede efectuar el trabajo en una sola calda, con lo cual se economiza tiempo, combustible y metal.

»El efecto de este poderoso aparato es igual al que produciria el peso de 16,000 kilógramos descargando cuarenta golpes por minuto. Puede obtenerse instantáneamente la accion alternativa del doble y del simple efecto. Por medio de una caja de distribucion convenientemente situada, se puede tambien cambiar en un momento la caida y la fuerza del golpe. Ya es sabido que el trabajo mecánico de todos los martillos que funcionan por efecto de la gravedad se representa por el peso de la masa multiplicado por la altura de la caida. Por consiguiente, cuanto mayor sea esta altura, más considerable es la accion, pero tambien más lento el trabajo. Con el martinete de doble efecto de que se trata, la fuerza del golpe puede triplicarse y la velocidad duplicarse al mismo tiempo. El vapor que hace funcionar al martinete se obtiene con el calor perdido del hogar donde se calienta el hierro que se ha de machacar. El peso de todo el aparato, comprendiendo la masa del martillo, el yunque, el tajo, el cilindro de vapor, etc., es de unos 100,000 kilógramos.»

El martinete es, por decirlo así, una máquina de vapor especial, en que la fuerza se invierte directamente en producir el movimiento del aparato. En las grandes fundiciones, fábricas de máquinas, aserradoras mecánicas, con frecuencia son las máquinas fijas, locomóviles á veces, las que producen y distribuyen á todos los talleres el movimiento por medio de engranajes y de correas; todas las diferentes secciones del trabajo mecánico reciben su impulso del vapor, y no se sabe qué admirar más en estos formidables trabajos, si la potencia del ingenio, ó su docilidad en prestarse á los usos más diversos.

¿No es en cierto modo maravilloso ver esas máquinas-herramientas trabajando el acero y el hierro con tanta facilidad como el carpintero ó el herrero labran la madera ó el metal; esas enormes tijeras que cortan el hierro en bruto ó las gruesas placas de palastro como las tijeras del sastre podrian cortar el paño más delgado? En otro tiempo apénas se raspaba el hierro; hoy se le acepilla como si fuese madera, y se le recorta ó agujerea como si fuese carton. Ciertas máquinas-herramientas de Indret están instaladas con bastante solidez para sacar una viruta de 40 milímetros en una longitud de 11 metros; el carro móvil que lleva el buril pesa por sí solo 14 toneladas. Entre las máquinas más curiosas de Indret debemos mencionar un torno de Mazeline, destinado á acepillar circularmente los árboles acodados. Su buril va sujeto á un disco giratorio sobre un carro para presentar sucesivamente á la herramienta todos los puntos que deben ser labrados. Vése allí igualmente un torno suspendido de M. Calla, cuyo disco mide 5 metros de diámetro, y bancos para alisar, perforar y pulir el hierro, el palastro y el bronce por todos los medios conocidos.

Si me propusiera enumerar y describir, áun sucintamente, todos los usos de la máquina de vapor en la industria moderna, necesitaria escribir no un capítulo, sino un libro, y bastante voluminoso. La encontraria en los hornos altos en los que funcionan máquinas horizontales á manera de fuelles para avivar los fuegos; en los talleres de lapidario, donde el vapor imprime á las muelas la prodigiosa rapidez de 2,500

vueltas por minuto; en las cervecerías, donde pone en movimiento las bombas que sirven para la trasvasacion de las masas líquidas: en las papelerías, donde hace funcionar las máquinas lavadoras y blanqueadoras del papel; en las alfarerías, en las fábricas de camas y pianos, donde asierra la madera y la recorta en forma de arabescos de todas clases; en las platerías,

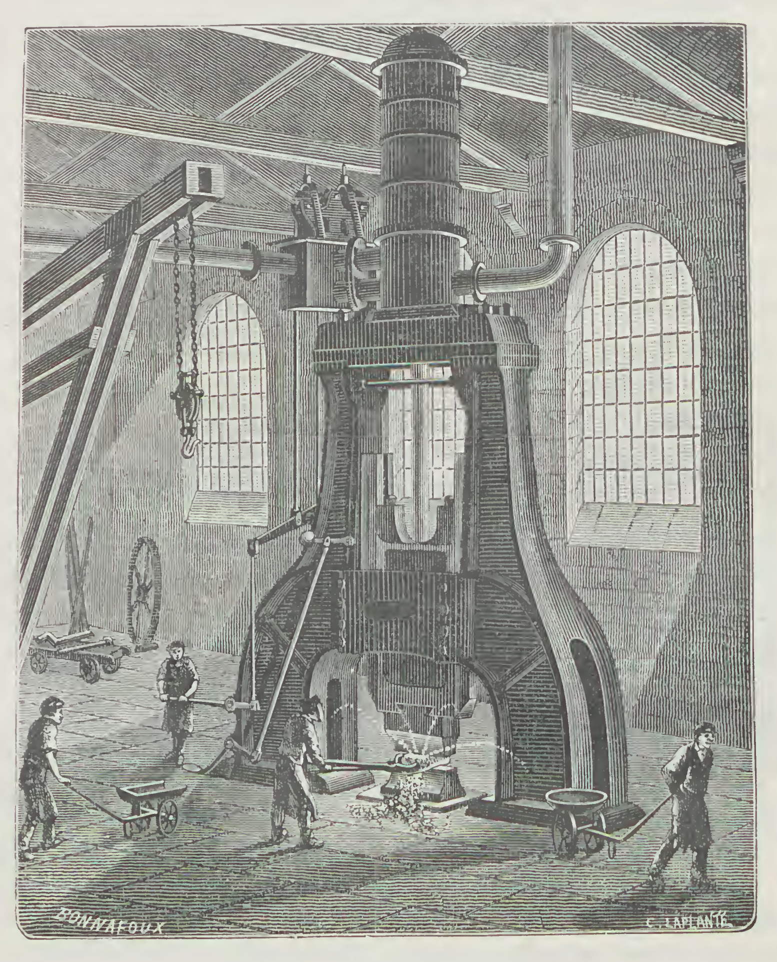


Fig. 271.—Martinete de vapor

en las casas de Moneda, donde las prensas de Uhlhorn perfeccionadas por Thonnelier y movidas por el vapor acuñan hasta 2,400 piezas por hora; en las fábricas de tabaco, de chocolate, y en fin en otras cien operaciones industriales que necesitan un motor poderoso, regular, rápido, continuo.

Pero hay dos grandes industrias en que el vapor desempeña un papel de inmensa importancia: en las fábricas de tejidos, en los telares, esos proveedores de vestidos para todo el género humano; y luégo en la industria tipográfica y litográfica, que nos da el alimento intelectual en su forma más asimilable, el libro y el dibujo.

Digamos ahora unas cuantas palabras acerca de la aplicacion del vapor á la imprenta.

En el mes de noviembre de 1841 efectuáronse las primeras tiradas de pliegos impresos por vapor en una máquina inventada por F. Kœnig. El periódico inglés *The Times* tuvo la honra y el provecho de este primer ensayo, que le permitió tirar 1,000 ejemplares por hora. Hé aquí lo que dice M. A. F. Didot acerca de esta aplicacion en su *Ensayo sobre la tipografía:*

«En esta máquina, la forma ó *rama* que contiene los tipos pasa horizontalmente, en virtud de un movimiento de vaiven, por debajo del cilindro de impresion en el cual está enrollado y sujeto con cintas el pliego de papel. En un principio, la tinta, sacada por un émbolo de la caja cilíndrica colocada en la parte superior, caia con regularidad sobre dos rodillos de hierro que la comunicaban á otra serie de rodillos, los dos últimos de los cuales, que eran de cuero, la distribuian sobre los caractéres. Una mejora importante sin duda fué la sustitucion del cuero de que estaban rodeados los rodillos, por una mezcla de cola y de melaza que for-

maba una sustancia elástica muy á propósito para la impresion de los caractéres. Posteriormente se perfeccionaron la toma de tinta y su distribucion. Por último, M. Kœnig reunió en una sola dos máquinas semejantes, de manera que pudiese imprimir un periódico por ambos lados á la vez. El pliego conducido por las cintas, pasaba de un cilindro á otro recorriendo un camino del que puede dar una idea la letra ∽ tendida horizontalmente. Durante su marcha por los cilindros, el papel recibia bajo el primero la impresion de un lado, y bajo el segundo cilindro la impresion del otro lado. Pero debo confesar que cuando M. Bentley me enseñó en 1814 esta admirable é inmensa máquina, muy complicada todavía, el segundo lado del pliego (la *retiracion)* no caia exactamente á registro.

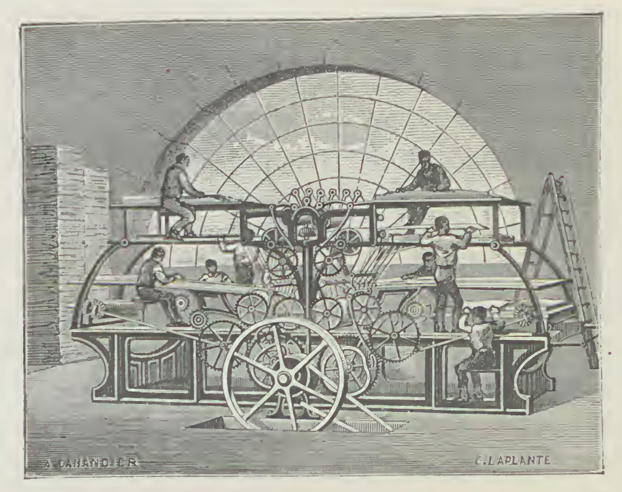


Fig. 272.—Prensa tipográfica de vapor

»A fuerza de pruebas y de tiempo, los señores Applegath y Couper lograron dar á su prensa mecánica tal grado de perfeccion, que el pliego conducido por las cintas, despues de recibir la primera impresion, pasa desde el primer cilindro á los dos tambores de madera que le hacen girar y va á aplicarse sobre el contorno de un segundo cilindro con tal precision que encuentra los tipos de la segunda forma justamente en el mismo punto en que están impresos por el lado opuesto los caractéres de la primera, despues de lo cual pasa á una mesa colocada entre los dos cilindros, donde un niño va recogiendo y apilando los pliegos.»

¿Se quiere saber á qué grado de rapidez ha llegado la impresion gracias á las máquinas movidas por vapor? Hé aquí algunos datos característicos:

La máquina de Applegath, de ocho cilindros, usada para la impresion del *Times*, tira 11,520 ejemplares por hora. El *New-York Sun*, periódico americano impreso en la máquina Hoe, cada una de cuyas páginas contiene ocho columnas de 200 líneas de 40 letras, tira de 16 á 20,000 ejemplares por hora. El cilindro central contra el cual se aplica la forma tiene 6 metros de desarrollo; otros ocho cilindros, como en la máquina de Applegath, recogen sucesivamente los pliegos y los imprimen en ocho caras diferentes del cilindro central. Esta máquina, servida por 16 operarios, dos por cilindro, produce un trabajo igual al que ántes exigia más de 300 prensistas.

Añadamos que si la impresion mecánica era en otro tiempo inferior, bajo el punto de vista del arte tipográfico, á la impresion hecha con las antiguas prensas, hoy se ha perfeccionado aquella tanto que las personas más difíciles de contentar apénas podrian distinguir una impresion de otra.

Hace algunos años que la litografía emplea el vapor y las máquinas reservadas hasta entónces para la tipografía. Los resultados obtenidos son notables, y la rapidez de la tirada ha proporcionado una economía importante á una industria sériamente amenazada por la competencia que le hacian los productos tipográficos.

VII

ESTADISTICA DE LAS MÁQUINAS DE VAPOR

Terminemos esta ligera reseña de las innumerables aplicaciones del vapor con algunos datos de estadística general á propósito para demostrar la verdad del aserto de que el vapor es el orígen de la revolucion más fecunda que hasta el presente haya trasformado la produccion humana, y propio tambien para justificar el nombre de *siglo del vapor* que á veces se da á nuestra época.

Francia tenia en 1865 un total de 19,724 máquinas de vapor con una fuerza total de 242,209 caballos. En este número no están comprendidas las locomotoras, que pasaban de 4,000. Esto representa para nuestro país un aumento de potencia productiva equivalente á una poblacion activa de más de 5 millones de obreros, resultado que indudablemente es hoy

bastante mayor. Tan sólo en Paris, habia en la misma época 1,189 motores de vapor de una fuerza total de 9,782 caballos, y comprendiendo los alrededores (en el solo departamento del Sena), habia 2,480 máquinas con una fuerza de 19,150 caballos. El movimiento de viajeros y mercancías por las vías férreas aumentaria en una gran proporcion los servicios que, en vista de las cifras precedentes, presta el vapor en nuestro país.

Agregando á las máquinas fijas empleadas en la industria las locomotoras y las máquinas de los buques de vapor, tanto de los mercantes como de los de guerra, podríamos calcular en 780,000 caballos de vapor la fuerza motriz total puesta á la sazon en actividad en Francia.

En Inglaterra, segun el ingeniero Feyburn, la fuerza empleada asciende á la enorme cifra de 3.650,000 caballos; fuerza que equivale al trabajo de 76 millones de obreros, es decir casi treinta veces igual á la de los brazos que sirven de auxiliares á las industrias británicas.

Carecemos de datos referentes á la industria manufacturera de los demás países de Europa y América; pero es posible formarse una idea de lo que pueden ser, considerando el inmenso desarrollo que ha tomado la red de los caminos de hierro en el mundo entero, red surcada dia y noche por el vapor, así como el que va adquiriendo de dia en dia la navegacion por vapor en los mares, los lagos y los rios.

En 1867 la longitud total de todas las líneas férreas explotadas en el globo llegaba á 156,663 kilómetros, casi diez y seis veces la circunferencia entera de nuestro planeta. Desde entónces, la América del Norte por sí sola ha aumentado su red en 20,000 kilómetros y la Rusia en más de 6,000; casi en todas partes se han construido ó empezado nuevas líneas; las locomotoras esparcen ahora sus torbellinos de humo por las Indias, por la Australia y hasta por el Japon, y los *steamboats* surcan todos los mares. La marina ha seguido, en efecto, el ejemplo de la industria manufacturera y de los trasportes terrestres, en menor escala á la verdad, pero en proporcion siempre creciente.

En Europa, de 100,000 buques que forman poco más ó ménos el total de la marina mercante, hay 4,500 vapores, pero debemos agregar que por lo general la cabida de estos es mucho mayor que la de los barcos de vela. Así es que en Francia, miéntras la cabida media de estos últimos buques es de 60 toneladas, la de los vapores llega á 280, por término medio tambien.

VIII

EXPLOSION DE LAS MÁQUINAS DE VAPOR

Acabamos de indicar los beneficios de que la civilizacion es deudora á la invencion de la máquina de vapor y á la introduccion progresivamente creciente de este poderoso motor en todas las industrias. Veamos ahora las desgracias que ha ocasionado, cuyos lamentables relatos leemos de vez en cuando en los periódicos. Toda medalla tiene su reverso. La explosion de las máquinas de vapor en las fábricas, en los ferrocarriles, en los buques causa todos los años cierto número de víctimas. ¿Será un tributo forzoso que la humanidad debe pagar siempre, como una triste compensacion, á todos los progresos que debe á la ciencia?

Todas las explosiones de las máquinas de vapor tienen en realidad una causa: por un motivo ó por otro, la presion del vapor producido en la caldera excede del límite de la resistencia de las paredes de esta; el metal se raja, estalla empujado por la fuerza irresistible del flúido, y lanzando en todas direcciones sus fragmentos, acumula en torno suyo ruinas y víctimas. A los efectos mecánicos de esta terrible explosion, se unen los que no puede ménos de producir una masa de vapor de elevadísima temperatura; el fogonista, los operarios ó los maquinistas, en una palabra todas las personas á quienes alcanzan los trozos de metal ó el vapor abrasador, salen horriblemente heridas, magulladas ó quemadas.

¿Cuáles son las causas de la explosion? Acabamos de decirlo. Un aumento anormal de presion, el cual puede proceder de las causas siguientes:

1.º Descenso del nivel del agua, que tiene por consecuencia una elevacion de temperatura de las superficies metálicas sometidas á la accion de los gases incandescentes del hogar sin ser enfriadas interiormente por el agua de la caldera. Estas superficies llegan á ponerse á la temperatura del rojo; su resistencia disminuye, se deforman y se rajan. El peligro es mucho

mayor si en tal momento la alimentacion de la caldera pone bruscamente en contacto con esta el agua que se trasforma en vapor en condiciones anormales. El exceso de flúido que resulta de aquí basta para ocasionar la explosion.

2.º Pueden producir el mismo accidente las incrustaciones que el agua va dejando en las paredes. La costra salina impide el contacto del líquido con el metal, el cual se enrojece, y si esta costra llega á desprenderse bruscamente, al tocar el agua las superficies enrojecidas ocasiona una repentina y considerable formacion de vapor cuya consecuencia puede ser la explosion de la caldera.

3.º El agua privada de aire y en reposo puede calentarse, sin hervir, á una temperatura que exceda con mucho de 100 grados; pero el menor choque ocasiona una ebullicion súbita y un exceso de vapor peligroso, segun hemos visto al referir el experimento de Donny.

Estas son tres causas de percances, independientes del buen estado de la máquina ó por lo ménos de la solidez de su construccion, independientes tambien del cuidado y vigilancia del maquinista, excepto la primera, que á decir verdad, es una de las más frecuentes. En cuanto á esta, los remedios preventivos son una vigilancia atenta del nivel del agua, y si este ha bajado, el cuidado de introducir el líquido poco á poco y despues de quitar fuego. La eleccion de un agua no incrustante, ó en caso contrario, la limpieza frecuente del interior de la caldera son dos cosas que deben tener muy en cuenta los maquinistas, ó los jefes ó dueños de las fábricas.

4.º El vapor puede llegar á tener una presion que exceda de los límites de la resistencia si las válvulas de seguridad son insuficientes ó funcionan mal, ó lo que es peor aunque por desgracia muy frecuente, si no funcionan absolutamente nada. Por lo tanto, debe tenerse una vigilancia incesante con estos aparatos. «Un maquinista que carga las válvulas, dijo con enérgica conviccion un ingeniero inglés contemporáneo, M. Fairbairn, es comparable al insensato que se precipita en un almacen de pólvora con una antorcha en la mano.» Solamente á ignorancia puede atribuirse una costumbre tan deplorable, siendo un imprescindible deber de los jefes de fábrica y de los ingenieros el hacerla cesar, no empleando sino maquinistas entendidos, ó instruyendo á los poco capaces.

5.º Por último, otra causa de explosion es la construccion defectuosa de una caldera, ó lo que es lo mismo, el mal estado procedente de la vejez ó del desgaste de sus distintas partes.

Al describir los diferentes tipos de calderas, hemos visto cuáles son las que ofrecen ménos riesgo de explosion, pero como la eleccion de tipos no está subordinada á esta sola condicion, los accidentes son por decirlo así inevitables En las fábricas donde se usan máquinas fijas y en los buques de vapor en que se hallan expuestas á más causas de destruccion, las explosiones son más frecuentes y temibles; en las locomotoras son mucho más raras, lo cual depende sin duda de la mayor vigilancia que sobre ellas se ejerce; tambien son en estas ménos peligrosas, porque á menudo se limitan á la rotura de un tubo, accidente que remedia con facilidad el maquinista, cerrando el tubo con tapones.

CAPÍTULO XII

LAS MÁQUINAS DE VAPORES COMBINADOS, DE AIRE CALIENTE Y DE GAS

I

LAS MÁQUINAS DE VAPORES COMBINADOS

Los principios de la teoría mecánica del calor permiten demostrar que el valor de una máquina térmica, su rendimiento, ó lo que es igual, su *coeficiente económico*, depende, en igualdad de circunstancias, de la diferencia de las temperaturas extremas entre las que funciona. Poco importa, por tal concepto, que se haga uso

de este ó del otro líquido para obtener el vapor cuya fuerza elástica se emplea como motor. Siendo la misma la cantidad de calor consumida, como este calor es el que se convierte en trabajo, el trabajo de la máquina subsiste siempre el mismo.

Compréndese pues que pueda ser ventajoso valerse de un líquido que se vaporice á una temperatura inferior á la de la vaporizacion del agua. Por ejemplo, el éter sulfúrico hierve á los 37°. El vapor de agua que, al salir del cilindro, va á liquidarse en el condensador, abandona una cantidad de calor suficiente para vaporizar el éter. El vapor de este último líquido puede entónces servir para hacer funcionar otra máquina aneja á la primera y á cuyo condensador se le puede mantener así á una temperatura inferior á la del condensador del vapor de agua. Esta combinacion viene á aumentar la diferencia entre las temperaturas extremas en que el flúido elástico funciona desde su entrada en el cilindro hasta su condensacion ó su salida al aire libre; y por consiguiente, la cantidad de calor utilizada ó de trabajo mecánico se habrá aumentado otro tanto.

Tal es el principio en que están basadas las máquinas de vapores combinados, de las que vamos á ocuparnos sucintamente.

El ingeniero francés du Tremblay discurrió y mandó construir en 1840 una máquina de vapores combinados de agua y éter, que fué instalada en un vapor de la línea de Argel á Marsella. Véase cuáles eran sus disposiciones principales.

Al salir del cilindro, el vapor de agua llega á un condensador cerrado, atravesado por una serie de tubos verticales llenos en parte de éter. El vapor de agua se condensa alrededor de los tubos, les comunica su calor de vaporizacion y eleva su temperatura lo bastante para que el éter que contienen se reduzca á su vez á vapor. Recogido éste en un depósito superior, pasa desde él á un cilindro en el cual actúa sobre un émbolo cuyo vástago está unido al árbol de la máquina. El trabajo de este émbolo se agrega por tal manera al del que está puesto en movimiento por el vapor de agua.

Al salir el vapor de éter del segundo cilindro, pasa á un condensador especial compuesto tambien de un sistema de tubos, pero estos rodeados de una masa de agua fria renovada de continuo. Este vapor recobra pues el estado líquido por efecto del enfriamiento de los tubos, y una bomba que mueve el balancin, impele el éter que de dicho enfriamiento resulta al depósito situado en la parte inferior de los tubos del primer condensador. El agua de condensacion, calentada por el exceso de calor del vapor de agua, va á parar á su vez á la caldera.

La gran inflamabilidad del éter, que á pesar de las mayores precauciones se escapaba por las junturas de las piezas, hacia peligrosas estas máquinas á causa de las explosiones ó de los incendios posibles. Esto no obstante, se las ha experimentado largo tiempo en los buques *du Tremblay* y *Galileo*, así como en una fábrica de cristal de Lyon, donde funcionaba una máquina fija de este sistema.

El oficial de marina Lafond sustituyó el cloroformo al éter; pero si el vapor de esta sustancia no es inflamable, es en cambio asfixiante; además, la práctica ha demostrado que su accion deterioraba muy pronto las guarniciones de los pistones. Las pruebas de que hablamos se han hecho en la máquina del *Galileo*. Se han empleado tambien los vapores combinados de agua y de sulfuro de carbono, ó bien de agua y de cloruro de carbono.

Otra máquina muy interesante, que funcionó en la Exposicion universal de 1867, es la máquina de amoniaco de M. Frot, ingeniero de marina. Este inventor sustituye el agua de la caldera con una disolucion amoniacal. Es sabido que á la temperatura ordinaria de 15° el agua disuelve unas 750 veces su volúmen de gas amoniaco, y que, si se la calienta hasta á 100°, el gas disuelto se evapora enteramente, no quedando vestigio de él en el agua de disolucion. M. Frot se ha basado en esta doble propiedad para construir su máquina, habiéndole probado los experimentos que hizo sobre la tension del líquido á diferentes temperaturas que esta tension, que á 100° es de siete atmósferas y media, llega á diez atmósferas á 120°. Mas para hacer práctico y económico el uso de la fuerza elástica de los vapores amoniacales era preciso resolver dos problemas: el primero consistia en condensar el vapor á su salida del cilindro, á fin de obtener una diferencia de presion suficientemente considerable; el segun-

do, en regenerar la disolucion amoniacal, sirviéndose el mayor tiempo posible del mismo líquido.

M. Frot lo ha logrado sin modificar esencialmente las disposiciones de las máquinas de vapor ordinarias. Los gases, al salir del cilindro y despues de ejercer su accion sobre el émbolo motor (entónces están formados de una mezcla de una parte de vapor de agua y cinco de gas amoniaco), van á parar á un condensador *de superficie* formado de una triple serie de tubos rodeados de una corriente continua de agua fria.

Para acelerar la condensacion, una bomba inyecta en la cámara que separa las dos primeras filas de tubos una disolucion amoniacal de baja temperatura no saturada, la cual se congela á su vez en la caldera. Los gases enfriados y en parte disueltos llegan desde el condensador á un depósito que se llama *disolutor tubular*. Allí acaban de disolverse en contacto con una disolucion amoniacal no saturada, y una bomba de alimentacion los conduce á la caldera. En este último trayecto, la disolucion regenerada circula al través de los serpentines sumergidos en el líquido que, segun acabamos de decir, sirve para la inyeccion: arrebata á este último el calor que posee, lo cual es doblemente útil, por cuanto la disolucion de alimentacion penetra más caliente en el generador y la de inyeccion vuelve, por el contrario, más fria al condensador.

Como los vapores amoniacales atacan el cobre, es forzoso reemplazar con hierro forjado todas las piezas de bronce de las máquinas ordinarias. Las pruebas hechas han demostrado que la máquina de amoniaco tiene varias ventajas sobre las de vapor de agua; aparte de la economía de combustible, que parece bastante considerable, y de la rapidez con que se obtiene la presion, están casi totalmente exentas de la incrustacion de las calderas, puesto que funciona largo tiempo el mismo líquido y el amoniaco preserva además á las paredes de las causas de oxidacion. Su principal inconveniente consiste, como en las máquinas de vapores combinados, en la dificultad de impedir los escapes de gas y en el peligro que resulta de su mezcla con el aire ambiente cuya accion en los órganos respiratorios es tan nociva.

II

LAS MÁQUINAS DE AIRE CALIENTE

La combinacion del vapor de agua con el de un líquido más volátil ó con un gas que el calor obliga á desprenderse de su disolucion es el motor empleado en las máquinas que acabamos de describir. Así pues, el vapor de agua desempeña siempre en ellas un cometido importantísimo. Se ha tratado de sustituirlo con una fuerza elástica enteramente distinta, la que se obtiene caldeando un gas permanente como el aire, ó inflamando una mezcla gaseosa explosiva. De aquí han resultado dos nuevas clases de máquinas motoras, las *máquinas de aire caliente* y las *de gas*, las cuales no dejan de ser máquinas térmicas, por cuanto siempre se saca del calor el trabajo mecánico que utilizan.

Segun parece, Montgolfier fué quien hizo los primeros ensayos que tuvieron por objeto emplear como fuerza motriz el aire dilatado por el calor. J. Niepce, uno de los inventores de la fotografía, se ocupó tambien del mismo problema. Roberto Stirling construyó en 1816 una máquina de aire caliente que, segun un juez competente en estas materias, E. Verdet, es «á la vez la más sencilla en teoría y la más abonada por la práctica.»

Posteriormente, el ingeniero sueco Ericsson ideó y mandó construir una máquina de aire caliente, que funcionó en un buque americano en 1853. Hé aquí en qué términos define M. Collignon el principio del nuevo motor:

«El capitan Ericsson colocaba en su primera máquina un *regenerador*, formado de un gran número de telas metálicas, en el camino del aire caldeado que salia del cilindro motor, cuando el émbolo emprendia su movimiento retrógrado. El cilindro motor estaba calentado directamente por el hogar: trasmitia su movimiento á un *cilindro de alimentacion*, verdadera bomba que tomaba aire en la atmósfera y lo comprimia en un depósito, desde el cual iba á parar debajo del émbolo motor atravesando las telas metálicas, donde se calentaba á expensas del calor abandonado por el aire caliente anteriormente expulsado.»

Ericsson modificó despues la máquina de aire caliente inventada por él: suprimió las telas metálicas, y el aire caliente era expulsado direc-

tamente á la atmósfera despues de ejercer su accion en el cilindro motor: era por consiguiente una máquina de simple efecto, y para ponerla en marcha, habia que poner el volante en movimiento con la mano. La máquina Laubereau que vamos á describir es, por este último concepto, parecida á la de Ericsson y hará comprender su mecanismo, que es en verdad muy sencillo.

El mecanismo motor de la máquina Laubereau se compone de dos cilindros metálicos A B, de diámetro desigual, cuyas capacidades interiores comunican entre sí por un tubo. En el primero, que está abierto en su parte superior, se mueve un émbolo macizo, el cual llena herméticamente el cilindro é impide toda comunicacion de la capacidad interna con el aire exterior. Estas piezas son el *cilindro* y el *émbolo motores* de la máquina.

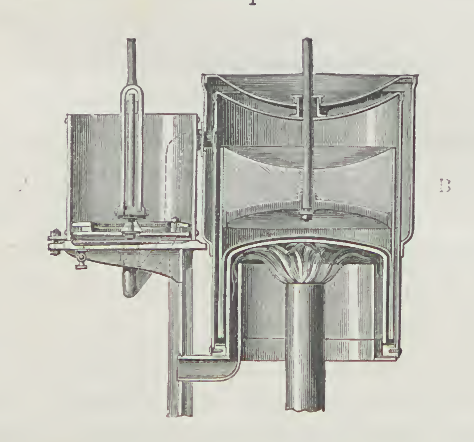


Fig. 273.—Seccion de los cilindros de la máquina Laubereau

El cilindro mayor B está completamente cerrado por sus dos fondos superior é inferior, ambos de forma cóncava. Un émbolo grueso, formado de una sustancia mala conductora del calor, de yeso por ejemplo, se mueve tambien en el cilindro, pero sin tocar sus paredes; es de forma doblemente cóncava, de modo que pueda adaptarse tanto al uno como al otro fondo del cilindro: es lo que puede llamarse el *cilindro de alimentacion* porque el aire que contiene, caldeado y enfriado alternativamente, es el que ejerce su accion en el émbolo motor, en el que por el contrario cesa esta accion á cada período de movimiento.

Para obtener estos efectos sucesivos, un foco de calor (que en el grabado es una luz de gas) caldea exteriormente la concavidad del fondo inferior del cilindro grande y por consiguiente el aire que está debajo del émbolo. La presion de este aire sobrepuja pues á la atmósfera, y empujando por debajo el émbolo del cilindro pequeño, le imprime un movimiento ascendente

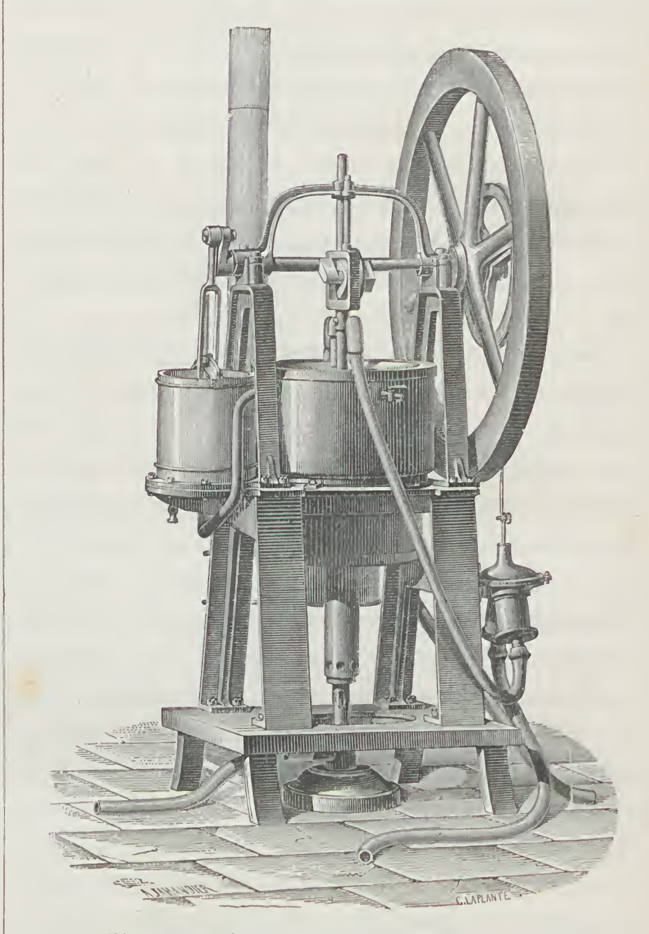


Fig. 274.—Máquina de aire caliente de Laubereau

que se comunica por el mecanismo ordinario al árbol y al volante de la máquina. El otro émbolo vuelve á bajar entónces, y se aplica sobre el fondo inferior, de modo que intercepta toda comunicacion del calor del foco con el aire que contiene. Este último se encuentra por el contrario en contacto directo con el fondo superior del cilindro grande, que es doble y por el cual circula una corriente continua de agua fria. El aire enfriado se condensa, y su fuerza elástica disminuye. La presion atmosférica predomina entónces, y el émbolo motor vuelve á bajar miéntras que el de yeso sube, y deja de nuevo que se caldee el aire.

Este período se reproduce indefinidamente y da á la máquina su actividad continua. Una bomba, puesta en movimiento por el árbol motor, lleva constantemente al doble fondo del cilindro grande el agua fria necesaria para enfriar el aire que acaba de actuar, y saca la que

se calienta cuando este aire cede su calor á las paredes.

Las máquinas de aire caliente, como todas las térmicas de gas distintas de la de vapor propiamente dicha, serian ventajosas para la pequeña industria, que no necesita más que fuerzas motrices bastante escasas y que puedan interrumpirse á menudo. La facilidad con que se las pone en marcha las hace económicas por este concepto; pero no lo serian para fuerzas motrices considerables, que debieran funcionar continuamente, como en las grandes fábricas.

El aire caliente tiene una ventaja sobre el vapor de agua; que entre límites apartados de temperatura se tienen presiones mucho menores; así pues la cantidad de vapor acumulada, y por consiguiente de trabajo, puede ser muy grande, sin que inspire temor la falta de resistencia de las cubiertas de las calderas; en cambio, prácticamente, si se necesita una gran fuerza motriz, hay que aumentar mucho la superficie de los émbolos. Por otra parte, el aire caliente á altas temperaturas quema las guarniciones de los émbolos y oxida y deteriora las superficies metálicas con las que está en contacto. El vapor de agua no tiene estos inconvenientes.

III

LAS MÁQUINAS DE GAS

Pasemos ahora á ocuparnos de otros motores que se usan ya con bastante frecuencia en las pequeñas industrias: nos referimos á las *máquinas de gas*.

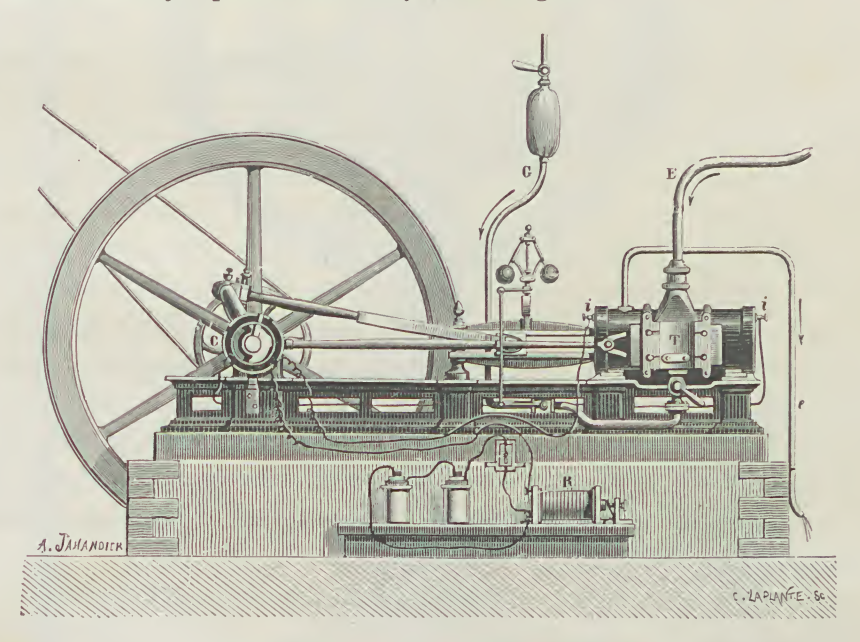


Fig. 275.—Máquina de gas del sistema Lenoir

Tambien es el aire dilatado el que proporciona la fuerza motriz de estas máquinas; pero en lugar de dilatarlo la accion de un foco de calor alimentado bajo la capacidad que lo contiene, se dilata por efecto del desprendimiento de calor producido por la inflamacion espontánea de una mezcla detonante. Esta mezcla se compone de aire y de gas del alumbrado en proporciones convenientes.

Los distintos modos de producir esta inflamacion han dado lugar á que se inventasen máquinas de gas de varias clases. Hagamos mencion únicamente del motor Lenoir, en el cual la mezcla explosiva, formada de 90 partes de aire y 10 de gas, resulta inflamada por las chispas sucesivas de un carrete de induccion; del motor Hugon, en el que un mechero móvil de gas es el que prende fuego á la mezcla; y finalmente, de las máquinas Otto y Langen, en las que la inflamacion la produce tambien un mechero encendido, pero fijo. Examinemos brevemente las disposiciones esenciales de cada uno de esos motores.

El motor Lenoir no difiere de las máquinas de vapor, en cuanto á su aspecto exterior; sino por la carencia de caldera y por la disposicion particular del mecanismo de distribucion.

El cilindro motor es un cuerpo de bomba de gran diámetro, que descansa horizontalmente

sobre el zócalo de la máquina, y cuyo vástago pone en movimiento, por medio de una biela y de una manivela, el árbol provisto por un lado de una polea motora y por otro de un volante. El cilindro lleva lateralmente dos cajas de distribucion T movidas por excéntricas, sirviendo una de ellas para introducir alternativamente en los dos lados del émbolo la mezcla explosiva de aire y de hidrógeno que llega por el tubo G; y la otra para dar salida á los productos de la combustion.

Junto á la máquina y en la obra de ladrillos en que esta descansa hay instalada una bobina de Ruhmkorff, alimentada por una pila de Bunsen, cuya bobina es la que produce las chispas sucesivas que tienen por objeto inflamar la mezcla gaseosa en cada una de las cámaras del cilindro. A este fin, cada uno de los hilos de la hélice inducida va á parar, en *i i*, á uno de los fondos metálicos del cilindro, en el cual penetran por una varilla aisladora de porcelana: la chispa brota entre el émbolo y este alambre de platino. La mezcla explosiva que llega al mismo instante á la cámara, en virtud del movimiento de la caja de distribucion, se inflama sucesivamente: el calor resultante de estas explosiones se comunica al aire, y al dilatarlo, suministra la fuerza motriz. Al propio tiempo, la otra caja de distribucion da salida al gas procedente de la combustion que se efectúa en la otra cámara. De aquí resulta el movimiento alternativo del émbolo, y los del árbol y el volante.

Como las paredes del cilindro se caldean á cada explosion, están rodeadas, á fin de evitar la temperatura elevada que seria su consecuencia, de una envolvente ó manguito por el cual circula sin cesar una corriente de agua fria, corriente que entrando por el tubo E, sale por el *e*.

Hemos dicho que el motor Hugon difiere principalmente del Lenoir por el modo de inflamarse la mezcla gaseosa. En lugar de chispas de induccion, tiene una luz de gas que el movimiento mismo de la máquina pone alternativamente en contacto con el gas ó la aleja de él.

Por este concepto, la máquina de gas de Otto y Langen se parece al motor Hugon; pero se distingue de él, así como del motor Lenoir, en un punto esencial. Es una máquina de simple efecto, no siendo la fuerza del gas caldeado y dilatado la que sirve de fuerza motriz, sino la presion atmosférica. En una palabra, el principio de su movimiento es análogo al de las primeras máquinas de vapor, las de Newcomen.

El grabado 276 representa su vista de conjunto.

En la columna que lleva en su extremo los órganos de trasmision, están encerrados el cilindro y el émbolo motor. El cilindro está abierto por arriba, y el gas inflamable solamente llega á la cámara inferior del émbolo. Una luz de gas, constantemente encendida, está situada en una cavidad lateral á la parte inferior del cilindro; en el grabado se ve esta luz. Cuando se establece la comunicacion entre ella y el espacio que contiene el gas detonante, lo cual se consigue por medio de una placa que pone en movimiento una barra de excéntrica adosada al árbol, sobreviene la inflamacion; la mezcla se caldea y se dilata bruscamente bajo el émbolo, levantándolo hasta lo alto del cilindro. Esta parte del movimiento no se utiliza, y al subir la barra del émbolo que engrana como una cremallera con una rueda dentada fija en el árbol, la hace girar como una polea loca. Cuando el émbolo vuelve á bajar por el influjo predominante de la presion atmosférica, su barra y la rueda de engranaje hacen girar el árbol y el volante; tal es la fase motriz propiamente dicha.

A la izquierda del grabado se ve un tubo por el cual llega el gas del alumbrado, y que remata en tres tubos, uno de los cuales sirve para alimentar la luz, otro para suministrar gas á la cámara de distribucion, y el tercero para introducir el mismo gas debajo del émbolo en el cilindro.

Terminemos esta descripcion de los motores térmicos, cuya invencion es muy reciente todavía, con algunas observaciones acerca de sus ventajas é inconvenientes, tales cuales nos las demuestran á la vez la teoría y la práctica.

Desde el punto de vista teórico, las máquinas de gas ó de aire caliente (en el fondo están basadas en el mismo principio) tienen sobre las de vapor la ventaja de que la temperatura de gas puede ser mucho más elevada, áun dando una presion bastante débil. Como el trabajo

mecánico tan sólo depende de la diferencia entre las temperaturas extremas, resulta que se puede utilizar mayor porcion de trabajo sin temor á los percances de una explosion; con una potencia no ménos considerable, las paredes de los órganos pueden ser más delgadas; mas, por otra parte, tambien hemos visto que las altas temperaturas de los gases ejercen un efecto destructor en las guarniciones y en las piezas metálicas. Así pues, la ventaja queda en gran parte anulada por tan grave inconveniente.

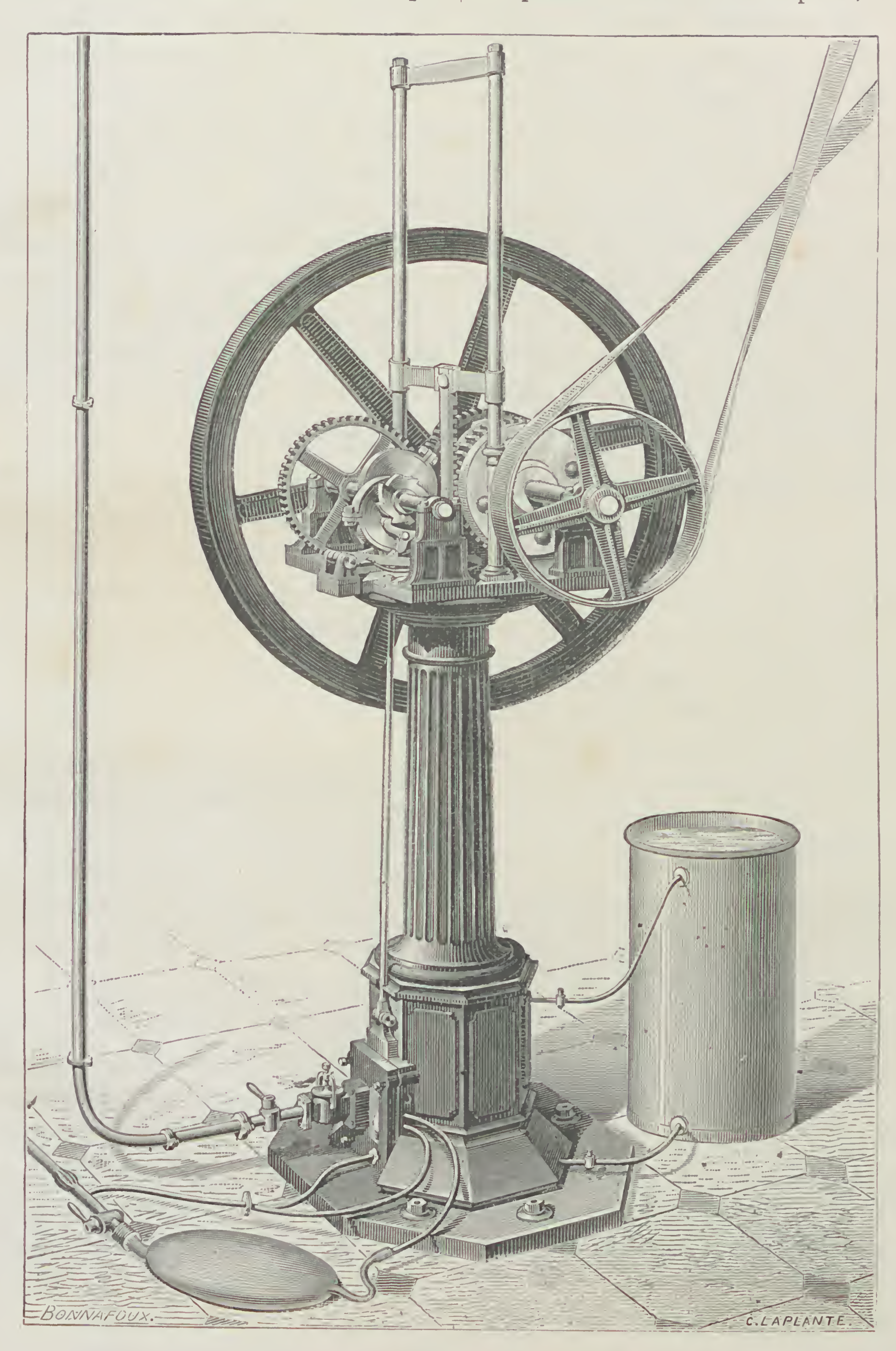


Fig. 276.—Máquina de gas de Otto y Langen

Pero las máquinas de gas presentan sobre los motores de vapor de agua una superioridad incontestable por lo que hace á la seguridad; están casi á cubierto de toda explosion, de todo riesgo de incendio. Se las pone en movimiento fácil y rápidamente; basta abrir ó cerrar una simple llave para poner la máquina en marcha ó pararla. No teniendo hogar ni caldera, ocupan ménos espacio, y se necesita menos personal para su funcionamiento y vigilancia.

En cambio, económicamente hablando son inferiores á las máquinas de vapor. De los ex-

perimentos hechos por M. Tresca con el motor Lenoir resulta que el consumo de gas llega de 2,500 á 3,000 litros por fuerza de caballo y por hora, esto es, el quíntuplo ó séxtuplo del combustible que gasta la máquina de vapor. Además, este motor necesita consumir mucha agua para enfriar el cilindro y el émbolo. La máquina de gas Otto y Langen es mucho más ruidosa (1) que la máquina Lenoir, la cual no deja de serlo y los movimientos bruscos del émbolo deben constituir una causa de rápido deterioro. Aparte de esto, todos los motores de gas adolecen de un inconveniente, el de que no pueden instalarse sino en donde hay fábricas de gas, y entónces en estas fábricas vuelve á tropezarse con los inconvenientes de las máquinas de vapor. Pero si no se los considera sino como motores de uso limitado, es decir, aplicables á la pequeña industria, en que la fuerza motriz útil no pasa de algunos caballos de vapor, entónces recobran su superioridad, hasta por lo que respecta á una relativa economía. En efecto, pueden amoldarse á todas las exigencias ó interrupciones frecuentes del trabajo, y el consumo cesa al punto, al paso que los motores de vapor, una vez encendidos y en marcha, siguen haciendo gasto durante dichas interrupciones. Por este concepto consideradas, las máquinas de aire caliente ofrecen verdadero interés, y es de esperar que presten grandes servicios, si, como es probable, se introducen en ellas perfeccionamientos comparables con los que ha recibido la máquina de vapor.

CAPITULO XIII

APROVECHAMIENTO DEL CALOR SOLAR

I

ESPEJOS USTORIOS

¿Es cierto que Arquímedes incendió con espejos ustorios la escuadra romana que al mando de Marcelo, sitiaba á Siracusa? ¿Es cierto que Proclo hizo otro tanto con la armada de Vitaliano durante el asedio de Bizancio?

Cuestion ha sido esta muy controvertida, negada por Descartes en su *Dióptrica* y resuelta por los eruditos en diferentes sentidos, pero que prueba cuando ménos que los antiguos conocian la propiedad que tienen los espejos cóncavos de reflejar en su foco y de condensar en un espacio muy reducido las rayos emanados de un manantial de calor.

Asimismo conocian los efectos de la refraccion al través de una masa de vidrio tallada en forma de bola ó de lenteja, segun se desprende de un párrafo muy curioso de *Las Nubés* de Aristófanes.

(1) M. Otto ha construido posteriormente una máquina horizontal de gas, que no produce ruido alguno, y por lo tanto no está sujeta al inconveniente de que hablamos.

La discusion del punto histórico de que tratamos, interesante por cierto, ha tenido el mérito de suscitar experimentos que han patentizado la intensidad de los efectos caloríficos que se pueden producir en el foco de un espejo esférico ó parabólico, ó tambien en el de una ó muchas lentes. Hé aquí los principales resultados de algunos de ellos, tomados de la *Enciclopedia* de d'Alembert y Diderot:

«Los más célebres espejos ardientes modernos son los de Septala, de Villette y de Tschirnhausen. El espejo ardiente de Marcelo Septala, canónigo de Milan, era un espejo parabólico que, segun Schot, prendia fuego á troncos de leña á 15 ó 16 pasos de distancia. El de Tschirnhausen iguala por lo ménos al de Septala en cuanto á su tamaño y efecto. Véase lo que acerca de él se lee en las *Acta eruditorum* de Leipzig:

«Este espejo enciende leña verde en un momento, y de tal modo que no se puede apagar el fuego soplando con fuerza. Hace hervir el agua, de suerte que se pueden cocer huevos en ella en un momento, y si se deja esta agua un

rato en el foco, se evapora. Derrite en un instante una mezcla de estaño y plomo de tres pulgadas de espesor; estos metales empiezan á fundirse gota á gota, en seguida corren de un modo continuo, y en dos ó tres minutos la masa queda enteramente deshecha. Tambien calienta muy pronto al rojo trozos de hierro ó acero, en los que la fuerza del fuego forma despues agujeros. El cobre, la plata, se liquidan tambien cuando se los acerca al foco. Asimismo enrojece las materias que no se pueden fundir, como la piedra, el ladrillo, etc.»

El espejo de Tschirnhausen tenia tres anas de Leipzig de ancho (1^m,69); su foco estaba á dos anas de distancia (1^m,13); era de cobre y de escaso espesor.

Un obrero francés de Lyon llamado Villette, construyó muchos espejos grandes, uno de los cuales lo adquirió la Academia de Ciencias. Era un segmento de esfera de 76 pulgadas (2^m,06) de radio, y por consiguiente de 38 (1^m,03) de foco; tenia 1^m,27 de abertura, y era de una aleacion de estaño, cobre y azogue. Sus efectos caloríficos fueron por el estilo de los del espejo ustorio ántes descrito.

Tambien hizo Buffon en el siglo pasado curiosos experimentos, valiéndose para concentrar los rayos solares, no de un espejo cóncavo, sino de una serie de espejos planos colocados de modo que enviaban á un solo punto los rayos del sol.

«Ha formado un espejo grande compuesto de muchos espejos planos (eran ciento) de medio pié cuadrado poco más ó ménos; cada uno de estos espejos tiene detrás tres tornillos por medio de los cuales es fácil colocarlos todos, en ménos de un cuarto de hora, de modo que reflejen en un solo punto la imágen del sol. Con este espejo compuesto, M. de Buffon ha encendido fuego á 200 piés de distancia.» *(Enciclopedia.)*

En efecto, á esta distancia encendió leña; á 140 piés derritió plomo, y á 100, plata.

El ilustre naturalista y físico habia querido realizar así la hipótesis del poeta griego Tzetzés, quien creia que por tal medio se habian incendiado las naves romanas en Siracusa. El hecho en sí venia á demostrar la posibilidad del invento de Arquímedes y de la accion patriótica atribuida al geómetra más grande de la antigüedad. Pero á Buffon se le habia anticipado el Padre Kircher, sin que él lo supiera, y en época más remota, Antemio, arquitecto de Santa Sofía, á quien se debe considerar como el verdadero inventor de los espejos planos articulados.

Bernières mandó construir en 1757 un espejo cóncavo de vidrio azogado, de 1^m,16 de abertura, y en cuyo foco la plata y hasta el hierro se fundian en pocos segundos; los guijarros se reblandecian, y corrian como vidrio líquido. (Daguin, *Tratado de Física.)*

Véanse ahora algunos detalles sobre los efectos caloríficos producidos por la refraccion al través de una lente convergente, es decir, por lo que se ha llamado *vidrio ardiente.* Los mismos físicos que hicieron experimentos con espejos los efectuaron tambien con lentes de grandes dimensiones.

«El mayor vidrio de esta clase, dice d'Alembert en la *Enciclopedia,* era el de Tschirnhausen: la anchura de la lente era de 3 á 4 piés, la distancia focal de 12, y tenia pulgada y media de diámetro; además, para hacer el foco más vivo, recogia los rayos por segunda vez otra lente paralela á la primera, colocada en el punto en que el diámetro del cono de los rayos formados por ésta era igual á la anchura de aquella, de suerte que esta última los recibia todos.»

Los efectos fueron semejantes á los del espejo ardiente del primer experimentador.

Uno de los experimentos más curiosos de cuantos se han hecho sobre la refraccion del calor es el de Mariotte, que hizo una lente convexa con un pedazo de hielo formado por la congelacion de agua bien pura y purgada de aire. Con este vidrio ardiente de nuevo género, Mariotte encendió pólvora fina.

Debemos hacer tambien mencion del vidrio ardiente de Bernières, construido en 1774 á expensas de un individuo correspondiente de la Academia de Ciencias, llamado Trudaine, y basado en el mismo principio que el de Tschirnhausen (fig. 121). El andamiaje que se ve representado en el grabado tenia por objeto el que una sola persona pudiera manejar el conjunto de las dos lentes, de modo que los rayos solares convergiesen siempre en el mismo punto.

Los vidrios ardientes tenian un inconve-

niente que los hacia inferiores á los espejos: el de que los rayos caloríficos, al atravesar lentes de cierto espesor, quedaban en parte absorbidos en ellas. Buffon trató de obviar este inconveniente discurriendo las lentes de escalones, que consisten en una reunion de coronas, cada una de las cuales forma parte de una lente de distancia focal constante, pero de menor espesor en las partes centrales. Ya describimos estos aparatos, que Fresnel perfeccionó para el alumbrado de los faros.

Hemos visto más arriba que se han aplicado los vidrios y los espejos ardientes á una cuestion interesante de astronomía física; la de averiguar si los rayos solares llegados hasta nosotros despues de reflejarse en la superficie de la luna, conservan aún calor apreciable. Si muchos observadores, desde Lahire y Tschirnhausen hasta Forbes y Tyndall no han podido comprobar nada, en cambio Melloni en 1846, y luégo Piazzi Smith, lord Rosse y Marié-Davy, han observado cierto efecto calorífico, como lo prueban los experimentos descritos en el capítulo XIV de la primera parte de este tomo.

II

PRIMEROS ENSAYOS DE APROVECHAMIENTO DEL CALOR SOLAR

El calor del Sol se puede aprovechar de dos modos: ó bien directamente, es decir, concentrado con objeto de obtener efectos puramente caloríficos para la fusion ó la volatilizacion de metales y otras sustancias; ó ya indirectamente, por su trasformacion en cualquiera de las formas de la energía: accion mecánica, química, eléctrica, etc. En el artículo anterior hemos visto que los antiguos quisieron hacer la primera de estas aplicaciones y áun la habian llevado á efecto, dado que sea cierto que Arquímedes incendiara con espejos ustorios la escuadra de los sitiadores de Siracusa. Un siglo despues, el gran geómetra Heron de Alejandría, que inventó tantas máquinas ingeniosas, ideó un aparato en el que la accion del calor solar dilataba el aire contenido en una redoma de cristal y hacia subir el agua al brazo de un sifon: esta fué la primera tentativa conocida del segundo modo de aprovechamiento del calor solar.

Salomon de Caus, el precursor de Papin en el empleo del vapor como fuerza motriz, pensó tambien en sacar del Sol la fuerza necesaria para poner el agua en movimiento en una especie de bomba, y con el nombre de *fuente continua*, describe una máquina que es una verdadera bomba solar, estando claramente indicado en ella el empleo de los vidrios ardientes para concentrar los rayos y aumentar su potencia.

Se han hecho despues otras tentativas para lograr la solucion de uno ú otro problema; pero ya hemos hecho mencion de las más importantes de las que propendian á obtener altas temperaturas, y las otras solamente ofrecen un interés de curiosidad histórica.

Agreguemos tan sólo á lo ya expuesto, que Lavoisier no se limitó á hacer pruebas con el gran vidrio ardiente de Trudaine, anteriormente descrito con el nombre de vidrio ardiente de Bernières; el gran químico se valió de él para hacer investigaciones prácticas muy interesantes en aquella época. Sus Memorias contienen el detalle de doscientos veinte experimentos hechos con toda clase de minerales y sustancias refractarias, pero sólo se trata en ellos de aplicaciones científicas, y no de usos industriales.

De Saussure, de cuyo heliotermómetro hemos hablado ya en el capítulo de la primera parte de este tomo consagrado á la medicion de la energía de las radiaciones solares, construyó en 1769 un aparato compuesto de cinco cajas superpuestas, de cristal blanco de Bohemia: este aparato, puesto al Sol por espacio de muchas horas, dió debajo de la quinta caja una temperatura de 75° R. (87°,5 C.) «Los frutos expuestos á este calor, dice, se cuecen y sueltan su jugo.» El mismo físico perfeccionó este aparato, cuya idea le habian sugerido los resultados que obtienen los jardineros en los invernáculos, y obtuvo un calor de 128° R. ó sea 160° centígrados. Ocurriósele aprovechar esta concentracion de la radiacion solar; «pero únicamente, dice, para las destilaciones, las decocciones, y en general para las operaciones que no requieren un grado de calor muy superior al del agua hirviendo.»

Por lo demás, en la época en que el célebre físico se dedicaba á estos ensayos, no se conocia aún la propiedad que el vidrio y las demás sustancias diatérmanas tienen de trasmitir en

proporciones desiguales los rayos de diferentes refrangibilidades; no se sabia que si una placa de vidrio da acceso al calor luminoso, detiene en cambio las radiaciones oscuras. En concepto de Saussure, los efectos de concentracion observados con su heliotermómetro consistian únicamente en que las paredes vítreas de que estaba formado se oponian al enfriamiento producido por el contacto del aire exterior.

Los trabajos de W. Herschel, y posteriormente los de Melloni y otros físicos, han dado la explicacion de estos efectos, segun hemos visto anteriormente. No necesitamos ocuparnos nuevamente de esta teoría; por lo cual nos concretaremos á mencionar otras tentativas de aplicacion.

Sir John Herschel reprodujo en 1837, en el Cabo de Buena Esperanza, los experimentos de Saussure, simplificando su heliotermómetro, é introduciéndolo en la arena del suelo despues de agrandar la pared de vidrio. Así obtuvo temperaturas que excedian de la del agua hirviendo (unos 120° como máximum con dos paredes de vidrio solamente). De este modo hizo algunos experimentos con huevos, frutas y carne que, expuestos al Sol, quedaron perfectamente cocidos en muy poco tiempo. «Los huevos se pusieron duros, dice Herschel, y su parte interior friable. Tambien puse una vez gran cantidad de carne y legumbres, que comieron los circunstantes encontrándolas de exquisito gusto. Si se aumenta el número de bastidores envolventes, si se los hace de cobre dados de negro por dentro, si se los aisla entre sí con soportes de carbon de leña, y además se los entierra entre arena seca, no dudo que se obtendrá una temperatura próxima á la ignicion, y esto, como se ve, sin necesidad de poner lentes.»

Babinet, mencionando este experimento del ilustre astrónomo, añadia: «Es cosa rara que en los países de cielo despejado como Egipto, Arabia y Persia, en que el combustible escasea mucho, no se hayan aprovechado los rayos del Sol concentrados debajo de vidrios ó por vidrios ó espejos ardientes. Con una lente de dos ó tres decímetros de diámetro, aunque esté mal trabajada, se hace hervir el agua al Sol casi instantáneamente. Un vidrio ardiente de esta clase se podria comprar al peso y apénas costaria más que igual peso en vidrios; fuera de esto, con algunas vidrieras, se ve que al mediodía se podria hacer un horno para cocer pan y carne con el Sol de los trópicos. Antes de hacer su experimento en grande escala, sir John Herschel se habia cerciorado de que un termómetro puesto en la misma localidad se mantenia horas enteras á un grado mucho mayor de lo que se necesitaba para hacer un guisado de carne.»

Hácia la época (1859) en que el ilustrado é ingenioso académico citado, indicaba en los anteriores términos la posibilidad de hacer tan sencilla aplicacion de las leyes del calor radiante, el profesor Mouchot hacia algunas pruebas con el propio objeto. Los primeros aparatos de este físico eran muy sencillos: una caldera metálica, dada de negro por dentro, colocada debajo de dos ó tres campanas concéntricas de vidrio, formaban su generador: un reflector de hojalata compuesto de dos placas cilíndricas soldadas en ángulo recto servia para proyectar el calor en la caldera. Mouchot introdujo algunas variaciones en la forma de estos dos elementos principales de sus aparatos: hé aquí la descripcion de la que adoptó en un principio, segun él mismo la trazó:

«Tomé un bocal de vidrio cuya pared lateral no era mucho más gruesa que la de un vidrio comun, y en el cual podia introducir fácilmente una vasija cilíndrica de cobre ó de hierro batido cuyos bordes descansaban en los del bocal; sobre todo esto puse una tapadera de vidrio, y esta especie de marmita solar me dió tan buenos resultados como el aparato anterior, porque colocada en el foco del reflector de plaqué de plata, hacia hervir en hora y media tres litros de agua á la temperatura inicial de 15°.

»Siendo bastante cómoda la forma de esta nueva caldera, me serví de ella para varios ensayos.

»Por ejemplo, pude hacer al Sol un excelente cocido, compuesto de un kilógramo de carne de buey y diferentes legumbres y verduras. A las cuatro horas de insolacion, todo quedó perfectamente cocido, no obstante haber pasado algunas nubes por delante del Sol; y el caldo fué tanto mejor cuanto que la marmita se habia calentado con gran regularidad.

»Para mayor claridad véase (fig. 277) la

figura del aparato con el que hice la prueba: *a* es el bocal de vidrio; *b* la vasija metálica dada de negro, cuyos bordes descansan en los de aquel; *c* la tapadera de vidrio, y por último, *d* el

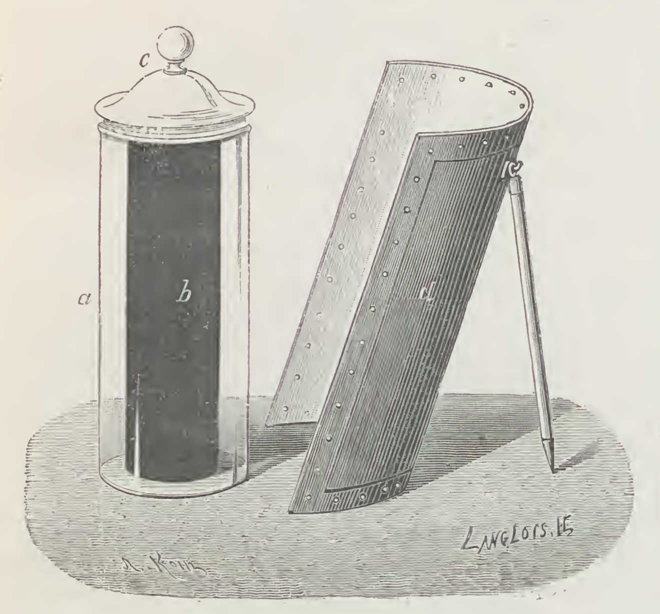


Fig. 277.—Marmita solar de M. Mouchot

reflector de plaqué de plata. Este reflector es cilíndrico y está inclinado de modo que concentra los rayos del Sol en la marmita, pudiéndose juzgar sin dificultad que esta se halla en el foco por el resplandor que se forma en la pared ennegrecida.

»Para trasformar la marmita en horno, me ha bastado cubrir la caldera con un disco de hierro batido puesto sobre la tapadera de vidrio. De esta suerte he podido cocer en ménos de tres horas un kilógramo de pan que no presentaba diferencia alguna con el que se vende en las tahonas.

»Por último, sustituyendo las dos tapaderas con un capitel de alambique de cabeza de moro (figura 278) que se adaptaba exactamente á la caldera, tuve sin necesidad de nuevos gastos un aparato muy á propósito para destilar alcohol al Sol. Puesto el capitel en movimiento con un serpentin metido en una corriente de agua muy fria, y el vaso metálico, que contenia dos litros de vino, en el bocal y en el mismo foco del reflector, recogí alcohol á los cuarenta minutos de insolacion. Como el aparato se calentaba poco á poco y de una manera continua, este alcohol estaba muy concentrado y tenia un aroma agradable.» *(El calor solar y sus aplicaciones*, por M. A. Mouchot.)

Con su reflector de plaqué de plata ante el

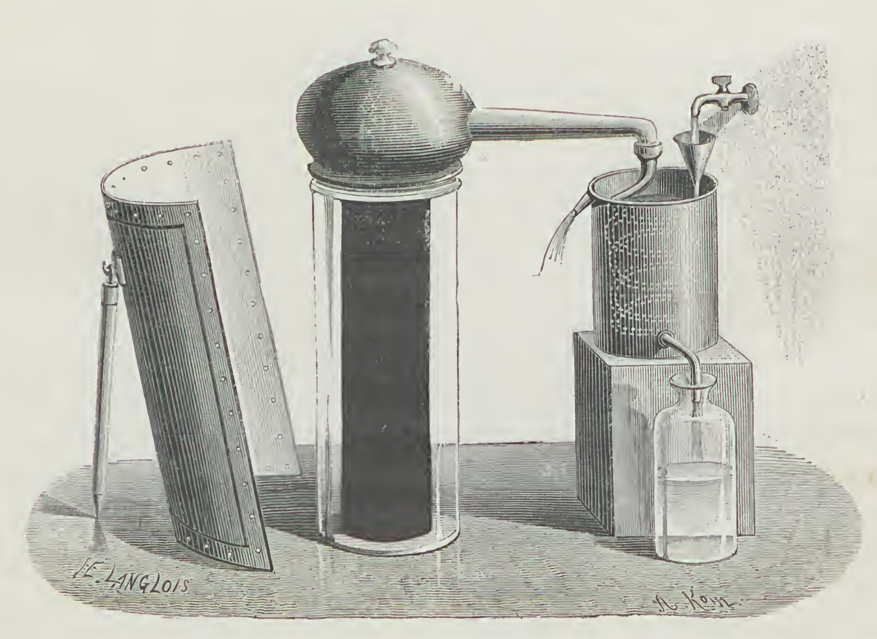


Fig. 278.—Alambique solar

cual instalaba un asador con un pedazo de carne de buey ó de carnero, M. Mouchot obtenia un asado cuyo grado de coccion no dejaba nada que desear, pero á decir verdad, el gusto de la carne así cocida era detestable, lo cual atribuye á la accion de los rayos químicos. Poniendo un vidrio amarillo ó encarnado delante del asador, se eliminan estos rayos.

El éxito de estas primeras tentativas estimuló á Mouchot para buscar la solucion del problema no ménos importante de la trasformacion del calor solar en agente mecánico.

Tratábase de averiguar si su generador podia producir, haciendo hervir el agua de la caldera, la cantidad de calor suficiente para poner en movimiento una máquina de baja ó media presion. En esta tentativa no fué ménos afortunado que en las anteriores, como vamos á ver.

III

EL GENERADOR SOLAR DE MOUCHOT

Despues de varias pruebas y de muchos experimentos hechos en Alenzon, Rennes y Tours, M. Mouchot adoptó para su aparato la forma que vamos á describir, tal como figuraba en la Exposicion universal de 1878 y tal como habia funcionado en Tours, desde 1875, aunque de menores dimensiones.

Tres piezas distintas componen el receptor ó generador solar: un espejo metálico de foco lineal, que reflejaba los rayos caloríficos del Sol; una caldera dada de negro, cuyo eje coincidia con dicho foco; una envolvente de vidrio que da paso á los rayos del Sol hasta las paredes de la caldera, pero que impide la salida tan luégo como la absorcion los ha trasformado en rayos oscuros.

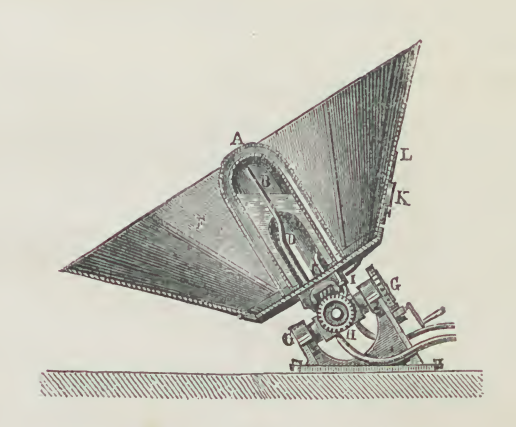


Fig. 279.—Generador solar de M. Mouchot

El receptor F (fig. 279) tiene la forma de un cono truncado de bases paralelas; es una especie de pantalla de quinqué con la abertura vuelta hácia el Sol. La generatriz de este cono truncado forma con el eje un ángulo de 45°; esta forma tiene la ventaja, segun lo demostró Dupuis el siglo pasado, de que á igual abertura del espejo, es la que da el máximum de intensidad al foco, por reflejarse todos los rayos incidentes perpendicularmente al eje. Doce sectores de plaqué de plata forman la pared reflejante del espejo; van sostenidos en una armadura de hierro y pueden correr por un bastidor, lo cual facilita su extraccion para la limpieza. Un disco calado de hierro forma el fondo del espejo, y en su centro se eleva la caldera de cobre compuesta de dos cubiertas concéntricas á modo de campana, unidas en su base por una brida de hierro. Entre estas dos cubiertas ó envolventes se pone el agua de alimentacion. Una campana de vidrio A de la misma forma que la caldera, la rodea descansando por su pié en el fondo del espejo. Los dos tercios de la capacidad están llenos de agua, y el otro tercio sirve de cámara de vapor. Por un tubo D de cobre, que penetra por una parte en esta cámara, y comunica por otra con el motor por medio de un tubo flexible, pasa el vapor á dicho motor. En I, en el tubo del vapor, están adaptados los aparatos de seguridad; en L y K, el nivel de agua y el manómetro. Finalmente, otro tubo flexible que sale del pié de la caldera, sirve para la alimentacion de esta.

Compréndese que para que el Sol lance el haz de sus rayos siempre paralelos al receptor, el generador habrá de poder tomar un doble movimiento, ó sea el de rotacion uniforme (15° por hora) al rededor de un árbol paralelo al eje de la Tierra, y el de inclinacion gradual sobre este árbol para seguir con las estaciones la declinacion del Sol. Es el doble movimiento que se comunica á los anteojos ecuatoriales en los observatorios, es decir, el llamado movimiento paraláctico. Pero en el caso presente se trataba de resolver la cuestion por medios sencillos, poco costosos. M. Mouchot lo ha logrado del modo siguiente:

«El aparato, dice, se apoya mediante unos muñones en un árbol perpendicular á su eje, y este árbol forma con el horizonte, de norte á sur, un ángulo igual á la latitud del lugar. De aquí resultan dos movimientos, merced á los cuales el generador puede seguir el curso del Sol, por cuanto, á cada semi-revolucion del árbol, gira de levante á poniente, al paso que una rotacion anual de 46 grados á lo sumo sobre sus muñones, lo lleva enfrente del Sol, cualquiera que sea la posicion aparente del astro. Cada uno de estos dos movimientos se efectúa por medio de un engranaje de tornillo sin fin, y sólo requieren que se dé una vuelta al manu-



brio, el primero cada media hora, y el segundo cada ocho dias. Y áun sin gastar mucho, se puede conseguir que el movimiento de oriente á occidente sea automático.»

El receptor solar que figuraba en la Exposicion universal de 1878 tenia un espejo cuya abertura medía unos 20 metros cuadrados. La caldera de hierro que llevaba en su foco, de $2^{m},50$ de altura y de 100 litros de capacidad, pesaba 200 kilógramos. Un niño bastaba para poner en movimiento el mecanismo que permitia orientar el aparato. Hé aquí algunos de los resultados obtenidos:

«El receptor solar del Trocadero, dice M. Mouchot, ha funcionado por primera vez el 2 de setiembre. En media hora hizo hervir 70 litros de agua; y á pesar de algunos escapes de vapor, el manómetro llegó á marcar una presion de 6 atmósferas.

»El 12 de setiembre, no obstante haber pasado algunas nubes por delante del Sol, la presion de la caldera subió más de prisa; el vapor permitia alimentar la caldera con un inyector, sin aminorar notablemente la presion.

»Por último, el 22 de setiembre en que el Sol brilló continuamente aunque un tanto velado, pude elevar la presion en la caldera hasta 6,2 atmósferas, y habria obtenido seguramente mayor presion, á no haberse nublado enteramente el Sol. Aquel dia, logré que funcionara, á la presion constante de tres atmósferas, una bomba Tangye que elevaba de 1500 á 1800 litros de agua por hora á 2 metros de altura.»

Hácia la misma época se practicaron otros ensayos, con pequeños aparatos cuyos espejos no tenian más que la quinta parte ó la mitad de un metro cuadrado de abertura, para cocer alimentos ó destilar alcoholes. Los más pequeños de dichos aparatos bastaron para asar en veintidos minutos medio kilógramo de carne de buey, y para hacer en una hora guisos que necesitaban cuatro horas con leña comun. Los alambiques solares hicieron hervir tres litros de vino en media hora, y dieron un aguardiente fino, y sin mal gusto. Mediante una segunda destilacion se hacia adquirir al mismo aguardiente todas las cualidades de un buen licor de mesa.

Tales eran los principales resultados conseguidos en Paris por el inventor de tan ingeniosa máquina, cuyas aplicaciones deben convenir más especialmente, en concepto de M. Mouchot, á los países en que el cielo está despejado meses enteros y cuyo recurso más precioso es el Sol. Era interesante por lo mismo repetir los experimentos susodichos en las condiciones que se reunen en aquellos países, y así lo hizo el autor al año siguiente en Argel. Con un receptor solar que tenia un espejo de $3^{m},80$, hizo funcionar una máquina horizontal sin expansion ni condensacion, á razon de 120 vueltas por minuto y á la presion constante de tres atmósferas y media. «Como el cálculo, dice, indicaba entónces un trabajo disponible de unos ocho kilográmetros, deduje que era posible hacer que mi receptor pusiese en movimiento una bomba que diese el mismo caudal de agua que una noria comun. El éxito correspondió á mis esperanzas el 18 de marzo, y pude ver que un aparato elevador, bastante imperfecto aún, daba un caudal de 6 litros por minuto á $3^{m},50$ ó de 1,200 litros por hora á 1 metro, lanzando á 12 metros un chorro de riego. Este resultado, que será fácil acrecentar, se obtiene sin intermision desde las ocho de la mañana hasta las cuatro de la tarde, sin que los vientos más fuertes ni las nubes pasajeras lo modifiquen de un modo notable.»

M. A. Pifre, que ayudó á M. Mouchot en sus experimentos y ensayos anteriores y á quien este encargó que prosiguiera el estudio práctico de sus receptores solares, ha introducido en ellos varias modificaciones, las más importantes de las cuales consisten en un cambio de forma del espejo y de la caldera. Hé aquí cómo explica dicho ingeniero los motivos que le han inducido á hacer los cambios indicados.

«La superficie reflectora adoptada por Mouchot era la de un cono truncado de generatriz rectilínea, inclinada 45° sobre su eje. El calor reflejado caldeaba la caldera en su parte superior mucho más que en la inferior. Para remediar este inconveniente, procuré dar al aparato una forma aproximada á la del paraboloide de revolucion.

»El nuevo reflector se compone de tres conos truncados enlazados con arreglo á una paralela, esto es, su generatriz es una línea mixta. La parte media de esta generatriz queda inclinada 45°. Su parte inferior forma un ángulo más

abierto en el centro y la superior un ángulo más cerrado, pero ambos bastante reducidos para que el calor reflejado, segun los experimentos de M. Desains, no pierda nada de su intensidad al llegar á la caldera. De este modo el foco resulta concentrado en una longitud mucho menor, la zona de caldeo máximum está más inmediata á la parte inferior de la caldera y se observan mejor las leyes de un caldeo racional.

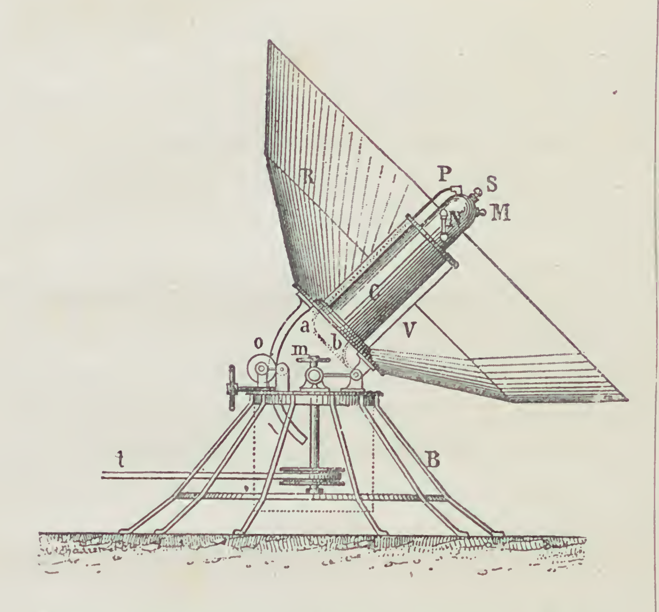


Fig. 280.—Receptor solar de Mouchot, modificado por M. Pifre, ó insolador (1)

» Merced á esta disposicion del reflector se puede además reducir á la mitad la altura de la caldera, sin que por eso sea menester aumentar su diámetro, pues ántes habia precision de meter un cilindro macizo en su interior para disminuir su capacidad. De esta suerte, quedan tambien reducidas á la mitad las pérdidas por radiacion exterior. Esta modificacion es de importancia capital cuando hay produccion de vapor con presion.»

M. Pifre habia aumentado así en un 50 á 80 por 100 el rendimiento de los aparatos aprovechando 12,12 calorias por minuto y por metro cuadrado de superficie de insolacion, al paso que los aparatos antiguos sólo daban, áun en Biskra, 9,2 calorias. M. Mouchot ha negado estos resultados, asegurando además que el rendimiento calorífico de su receptor probado en Argelia llegaba á un 75 por 100. En nuestro concepto, habria un medio sencillo de dirimir la cuestion de la superioridad de forma dada á uno ú otro reflector, el cual consistiria en hacer experimentos comparativos con dos aparatos de cada sistema, de dimensiones iguales y que funcionaran simultáneamente en un mismo punto.

Una comision nombrada para hacer experimentos con el aparato de M. Pifre y para valuar su rendimiento práctico, ha efectuado en 1881 en Montpellier una serie de pruebas que el ponente de dicha comision, M. Crova, resume en estos términos:

«Se han verificado los experimentos en el polígono del cuerpo de Ingenieros, en una altura perfectamente expuesta al Sol en todos sentidos; han durado desde 1.º de enero hasta 31 de diciembre de 1881, y se han hecho de hora en hora, todos los dias en que ha brillado el Sol y han sido posibles las observaciones.

» Los rayos solares, concentrados en la línea focal del espejo, daban en una caldera ennegrecida que ocupaba su eje, y que estaba rodeada de una envolvente de vidrio. El agua entraba en ebullicion y su vapor se condensaba en un serpentin enfriado por una corriente de agua. Con arreglo á las fórmulas de Regnault se podia deducir del peso del agua destilada por hora el número de calorias utilizadas por el aparato.

» De las observaciones actinométricas efectuadas de hora en hora se deducia el número de calorias incidentes en cada una de estas, tomando el promedio del actinómetro al principio y al fin de cada hora.

» Al mismo tiempo se medía la temperatura del aire, su estado higrométrico y el calor del Sol que permitia calcular el espesor de la capa atmosférica atravesada, merced á la fórmula de Laplace.

» El número de las calorias utilizadas y el de las incidentes se expresaban en grandes calorias (kilogramogrado) recibidas en una hora en 1^{m},9 de superficie perpendicular á los rayos

(1) R, reflector; C, caldera; V, cilindro de vidrio; P, entrada del vapor; N, cúpula de vapor y nivel de agua; S, válvula de seguridad; M, manómetro; B, soporte del aparato; *a*, tubo de llegada del vapor; *b*, tubo de alimentacion de la caldera; *m*, volante de la máquina; *t*, correa de trasmision; *o*, mecanismo de orientacion. Como se ve, este insolador tiene un reflector formado de dos conos truncados, en vez de tres.

solares: su cociente daba el rendimiento económico del aparato.

»Véanse los principales resultados obtenidos en estos setenta y seis dias, durante los cuales se han hecho 930 observaciones y destilado 2,725 litros de agua:

PROMEDIO GENERAL DE LOS VALORES MEDIDOS DURANTE EL AÑO 1881, Y REFERIDOS Á 1 METRO CÚBICO Y Á 1 LITRO

		Máximum	
	calorias	calorias	
Calor recibido directamente.	615'1	945'0	(25 abril)
Calor aprovechado por el aparato.. . .	258'8	547'5	(15 junio)
Promedio de los rendimientos. . . .	0'491	0'854	(14 junio)

»El rendimiento no es proporcional á la intensidad calorífica de las radiaciones solares, y casi nunca varía en el mismo sentido. Y en efecto, las radiaciones ocurren en Montpellier en la primavera, en cuya época el aire llega á su máximum de sequedad y de trasparencia calorífica. Por el contrario, la cantidad absoluta de calor aprovechado depende esencialmente de la temperatura del aire; cuanto más elevada es esta, es decir, cuanto más débil es el descenso de temperatura, ménos influencia tiene el enfriamiento, y mayor es la cantidad de calor aprovechado. Los rendimientos máxima corresponden por lo comun á las mínima de intensidad de las radiaciones; cuando ocurren las intensidades más fuertes, las radiaciones oscuras, no trasmisibles por el vidrio, quedan detenidas por el cilindrio vítreo, y el rendimiento disminuye por más que aumente la cantidad de calor aprovechado. Lo contrario sucede cuando las radiaciones incidentes se debilitan por efecto de su trasmision al través de una atmósfera dotada de escasa trasparencia calorífica, que detiene las radiaciones de grandes longitudes de onda, y trasmite las que sólo sufren una escasísima pérdida á su paso al través del cilindro de vidrio que rodea la caldera.

»El Sol no brilla en nuestros climas templados con la continuidad suficiente para que se puedan utilizar prácticamente estos aparatos. En climas muy secos y cálidos, la posibilidad de su utilizacion depende de ciertas circunstancias que no debemos discutir aquí, tales como la mayor ó menor dificultad de proporcionarse combustible, el precio y la facilidad de trasporte de los aparatos solares.»

Aun cuando las conclusiones numéricas de este dictámen sean bastante ménos favorables que las indicadas por M. Pifre, vése que la idea de utilizar industrialmente el calor solar, estudiada y ensayada con tanta perseverancia por M. Mouchot, ha sido llevada por el inventor de los receptores solares á un grado de realizacion práctica que permite abrigar la esperanza de que ha de tener pronta é importante aplicacion.

Los receptores solares de M. Mouchot, ó los insoladores de su continuador M. Pifre, construidos de diferentes tamaños en relacion con sus usos, ¿estarán pronto en marcha en los países abrasados por el Sol, sirviendo aquí para usos culinarios, allí, en forma de alambiques, para destilar y fabricar alcohol ó perfumes, acullá, en forma de bombas, para sacar agua de los manantiales, convirtiendo directamente en fuerza el calor inextinguible del gran hogar de nuestro mundo? Sin que participemos del entusiasmo de los inventores en el mismo grado que ellos, entusiasmo tan natural y tan necesario para el buen éxito de todas las empresas que salgan un tanto de los senderos trillados, confiamos en que muy en breve será un hecho consumado la realizacion de una parte al ménos de los servicios que pueden prestarnos los aparatos solares.

FIN DEL TOMO CUARTO




EL MUNDO
FISICO
4
301
203